



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften

Wissenschaftliche Arbeit im Fach: Fachdidaktik Physik

Lehramt an Gymnasien

**Entwicklung einer Unterrichtseinheit zur  
Astroteilchenphysik unter Einsatz von  
Cosmic@Web**

eingereicht von

**Schröter, Lukas**

geboren am 02.10.2000 in Reichenbach im Vogtland

Betreuerin: Frau Dr. Farahnaz Sadidi

Zweitgutachten: Frau Prof. Dr. Gesche Pospiech

Dresden, den 19.04.2024

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	04
1.1 Ziele der Arbeit	05
1.2 Inhalt und Struktur der Arbeit	06
2 Theoretischer Hintergrund	07
2.1 Fachlicher Hintergrund: Astroteilchenphysik	07
2.1.1 Grundlagen der Astroteilchenphysik	08
2.1.2 Kosmische Strahlung und Myonen	16
2.1.3 Schülervorstellungen	23
2.2 Didaktischer Hintergrund: Cosmic@Web	26
2.2.1 Charakterisierung von Cosmic@Web	26
2.2.2 Konzept von Cosmic@Web	28
2.2.3 Arbeiten mit Diagrammen im Physikunterricht	36
2.2.4 Arbeiten mit Diagrammen in Cosmic@Web	40
2.2.5 Anwendungsmöglichkeiten im Unterricht	41
2.2.6 Schülervorstellungen zum Arbeiten mit Diagrammen	45
2.3 Problemlöseverhalten	48
2.3.1 Definition des Problemlöseverhaltens	48
2.3.2 Rolle des Problemlöseverhaltens im Physikunterricht	51
2.3.3 Problemlöseverhalten in Bezug auf Cosmic@Web	53
2.4 Untersuchungsmethode: Teaching Experiment	55
2.4.1 Kriterien beim Erstellen von Teaching Experiments	56
2.4.2 Evaluation von Teaching Experiments	58
2.4.3 Beitrag des Teaching Experiments zum Physikunterricht	59
3 Untersuchung	61
3.1 Studiendesign	61
3.2 Forschungsfragen	71
3.3 Operationalisierung	73

3.4	Untersuchungsdurchführung und Erhebungsinstrumente	75
3.5	Bedingungsanalyse	85
3.6	Reflexion der Teaching Experiments	88
4	Auswertung	93
4.1	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	93
4.1.1	Akzeptanz der Grundideen und Lernzielkontrolle	93
4.1.2	Kompetenzen beim Arbeiten mit Cosmic@Web	96
4.1.3	Vermittlung der fachlichen Inhalte	98
4.1.4	Problemlöseverhalten beim Arbeiten mit Cosmic@Web	108
4.2	Offene Fragen	113
4.3	Schlussfolgerungen für die Einbindung in den Physikunterricht	115
5	Unterrichtskonzept	120
5.1	Erste Doppelstunde: Grundlagen der Astroteilchenphysik	120
5.2	Zweite Doppelstunde: Einführung in Cosmic@Web	127
5.3	Dritte Doppelstunde: Arbeiten mit Cosmic@Web	134
6	Fazit	140
7	Literaturverzeichnis	143
8	Abbildungsverzeichnis	148
	Selbstständigkeitserklärung	158
A	Anhang	159

## 1 Einleitung

Ein Themenfeld forschungsnah, spannend, kompetenz- und interessensfördernd unterrichten zu können, ist ein großes Anliegen vieler Physiklehrer\*innen (vgl. Karg et al. (2021), S. 7). Das Erreichen dieses Ziels ist mit einigen Herausforderungen verbunden, welche es zu bewältigen gilt. Der ansteigende Mathematisierungsgrad in den höheren Klassenstufen, also das Verbinden physikalischer Inhalte mit der formalen mathematischen Beschreibung (vgl. Uhden (2016), S. 18), das adäquate Auseinandersetzen mit verschiedenen physikalischen Modellen sowie das Arbeiten mit physikalischen Diagrammen, welches die Lernenden häufig vor Probleme stellt (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 145), sind nur einige der Schwierigkeiten, die es dabei zu überwinden gilt. Eine Möglichkeit, um diese Hürden aktiv zu bewältigen, könnte sich in der zehnten Klassenstufe im Anschluss an den dritten Lernbereich „Kosmos, Erde, Mensch“ bieten (vgl. SMK (2022), S. 31). Im Zusammenhang mit den vorher vermittelten Inhalten der Astronomie kann dieser Zeitpunkt genutzt werden, um den Schülern\*innen die fachlichen Grundlagen der Astroteilchenphysik näher zu bringen. Bei der Astroteilchenphysik handelt es sich um ein vergleichsweise junges Teilgebiet der Physik, welches auf den von Victor Hess mit der Entdeckung der kosmischen Strahlung im Jahre 1912 gelegten Grundlagen aufbaut (vgl. Karg et al. (2021), S. 11). Es versucht dabei, die Forschung von Astronomen\*innen und Kosmologen\*innen, welche Objekte auf sehr großen Längenskalen betrachten und erforschen, und Teilchenphysikern\*innen, die sich mit dem fundamentalen Aufbau von Materie befassen, zusammenzuführen (vgl. Karg et al. (2021), S. 11).

Aber nicht nur das inhaltliche Aufarbeiten physikalischer Inhalte ist Bestandteil der Aufgaben einer Lehrkraft, sondern auch das Herausarbeiten didaktischer Strategien. Dazu gehören das Erstellen und Aufbereiten von Unterrichtsmaterialien, um den im Lehrplan vorgegebenen Lernstoff anschaulich und sinnvoll an die Schüler\*innen vermitteln zu können. Im heutigen Zeitalter der Digitalisierung bietet es sich an, auf digitale Medien zurückzugreifen, da die Lernenden mit diesen vertraut sind und so der Unterrichtsstoff auf eine moderne, verständliche und motivierende Weise vermittelt werden kann. Für das Unterrichten astroteilchenphysikalischer Inhalte hat das „Deutsches Elektronen-Synchrotron“ (DESY) in Zeuthen ein Online-Tool namens Cosmic@Web entwickelt, welches Echtzeiten für prominente



Experimente der Astroteilchenphysik zur Verfügung stellt und darüber hinaus zahlreiche Möglichkeiten zur Diagrammerstellung bietet (vgl. DESY-Cosmic@Web).

## **1.1 Ziele der Arbeit**

Das Ziel dieser Staatsexamensarbeit besteht in der Entwicklung eines sechsständigen Unterrichtsentwurfs zu den Grundlagen der Astroteilchenphysik und der kosmischen Strahlung. Inhaltlich soll diese an den Lernbereich 3 „Kosmos, Erde, Mensch“ (vgl. SMK (2022), S. 31) der zehnten Klassenstufe anschließen und auf den dort gelegten Grundlagen aufbauen sowie diese erweitern. Konkret bedeutet das, dass die Schüler\*innen fachlich fundierte und korrekte Vorstellungen zum Standardmodell der Elementarteilchen, zum Nachweis kosmischer Teilchen und zur Auswertung physikalischer Diagramme erlangen und diese durch geeignete Übungen festigen.

Das Arbeiten mit Cosmic@Web mit den zahlreichen Möglichkeiten zur Diagrammerstellung und die Diskussion wissenschaftlicher Fragestellungen soll dabei einen wichtigen Stellenwert einnehmen. Mit dem Verfassen dieser Staatsexamensarbeit hoffe ich, das Potenzial der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Cosmic@Web für einen modernen und interessanten Unterricht hervorheben zu können, aber auch die Rolle der Astroteilchenphysik im zukünftigen Schulunterricht zu betonen. Auch beabsichtige ich damit den Einsatz von Cosmic@Web für andere Lehrkräfte zu erleichtern.

Um diese Unterrichtseinheit bestmöglich evaluieren zu können, liegt das Hauptaugenmerk zunächst auf der fachlichen und didaktischen Analyse des Lernstoffes und den zu verwendenden didaktischen Werkzeugen, wie beispielsweise Cosmic@Web. Die auf dieser Analyse basierenden Ergebnisse sollen anschließend in Teaching Experiments überprüft und ausgewertet werden. Dabei stehen drei Forschungsfragen im Vordergrund:

- 1 Welche Kompetenzen werden für das Arbeiten mit Cosmic@Web benötigt?
- 2 Inwieweit können fachliche Inhalte aus der Astroteilchenphysik über Cosmic@Web vermittelt werden?
- 3 Welches Problemlöseverhalten beobachtet man während der Nutzung von Cosmic@Web bei den Lernenden in Relation zu dem erteilten Arbeitsauftrag?

Mit Hilfe der Auswertung der Teaching Experiments und dem Beantworten der Forschungsfragen kann anschließend ein fachlich korrektes und didaktisch ansprechendes Unterrichtskonzept entworfen werden.

## **1.2 Inhalt und Struktur der Arbeit**

Aus physikdidaktischer Sicht besteht zunächst die Notwendigkeit des Herausarbeitens und Analysierens astroteilchenphysikalischer Themeninhalte. Deshalb liegt der Schwerpunkt im zweiten Kapitel dieser Arbeit auf den fachlichen Grundlagen der Astroteilchenphysik mit besonderem Fokus auf dem Standardmodell der Elementarteilchen und den Grundlagen der kosmischen Strahlung. Im Anschluss an diese fachliche Analyse wird das Augenmerk auf die didaktischen Grundüberlegungen für diese Unterrichtseinheit gerichtet, wobei vor allem die Rolle des Online-Tools Cosmic@Web im Vordergrund steht. Im Zusammenhang mit Cosmic@Web wird ebenfalls das Problemlöseverhalten zunächst allgemein definiert sowie im Zusammenhang mit Cosmic@Web analysiert. Den Abschluss des zweiten Kapitels bilden die grundlegenden Überlegungen zu den Teaching Experiments, welche das dritte Kapitel vorbereiten.

Im dritten Kapitel dieser Arbeit wird die in Form von Teaching Experiments durchgeführte Forschung vorgestellt. Dies inkludiert das erneute Betrachten der zugrundeliegenden Forschungsfragen und deren Operationalisierung. Auch das Studiendesign, die genaue Durchführung sowie die verwendeten Materialien und Erhebungsinstrumente werden beschrieben. Den Abschluss dieses Kapitels bildet neben der Analyse der Rahmenbedingungen die Reflexion der Designentscheidungen und des Durchführungsprozesses der Teaching Experiments, sodass die durch diese Forschung gewonnenen Erkenntnisse kritisch hinterfragt und angemessen evaluiert werden können. Die anschließende Auswertung sowie das Beantworten beziehungsweise Diskutieren der Forschungsfragen, aber auch das Analysieren eventuell offen gebliebener Fragen erfolgen im vierten Kapitel. Im fünften Kapitel wird das auf diesen Erkenntnissen aufbauende Unterrichtskonzept vorgestellt und dessen grundlegende fachliche und didaktische Strukturen erörtert.

## **2 Theoretischer Hintergrund**

In diesem Kapitel der Arbeit werden die grundlegenden Gedanken zur Unterrichtseinheit beleuchtet. Dazu zählt die Analyse der fachlichen Inhalte der Astroteilchenphysik, aber auch die Analyse des Online-Tools Cosmic@Web, welches die Rolle als didaktisches Werkzeug einnehmen kann. Insgesamt dient dieses Kapitel ebenfalls zur Vorbereitung der Teaching Experiments, in welchen die ersten Entwürfe der Unterrichtsmaterialien getestet werden sollen.

### **2.1 Fachlicher Hintergrund: Astroteilchenphysik**

In den folgenden Abschnitten werden die fachlichen Hintergründe der Astroteilchenphysik skizziert. Diese Inhalte sollen anschließend, gegebenenfalls in reduzierter Form, als fachliche Grundlage des Unterrichtskonzepts dienen. Bei der Astroteilchenphysik handelt es sich um einen jungen Zweig der Physik, welcher auf den im Jahre 1912 von Victor Hess gemachten Entdeckungen zur kosmischen Strahlung aufbaut (vgl. Karg et al.(2021), S. 11). Dabei bildet dieses Forschungsfeld einen Schnittpunkt zwischen der Teilchenphysik, der Astronomie und der Kosmologie. Während Astronomen\*innen und Kosmologen\*innen Phänomene auf unfassbar großen Längenskalen beobachten und zu erklären beabsichtigen, untersuchen Teilchenphysiker\*innen die Gesetzmäßigkeiten auf den kleinsten Längenskalen (vgl. Karg et al. (2021), S.11). Was verbindet also diese Forschungszweige, die scheinbar völlig gegensätzliche Themenkomplexe bedienen?

Um die Geschichte unseres Universums und seiner elementaren Bestandteile adäquat beschreiben und erklären zu können, benötigt man nicht nur die Erkenntnisse der Astronomie und Kosmologie, sondern auch die Modelle der Teilchenphysik. Von der Entstehung von Sternen über die Kernfusionsprozesse in deren Schalen bis hin zur Entstehung und den Eigenschaften der kosmischen Strahlung – für die Beschreibung dieser und vieler anderer Phänomene benötigt man die Verbindung dieser drei Disziplinen (vgl. Karg et al. (2021), S. 11). Astroteilchenphysiker\*innen „überprüfen die Gültigkeit grundlegender Gesetze der Physik“ (Karg et al. (2021), S. 11) und richten ihre Blicke dabei auf Orte im Universum, an denen die uns bekannte und vertraute Alltagsphysik nicht gilt.

### **2.1.1 Grundlagen der Astroteilchenphysik**

Wie bereits erwähnt, bildet die Astroteilchenphysik einen Schnittpunkt zwischen der Astronomie, der Kosmologie und der Teilchenphysik. Dieser Abschnitt soll dazu dienen, die Grundideen und Modelle, welche für die Astroteilchenphysik bedeutsam sind, aufzuzeigen.

Sowohl die Astronomie als auch die Kosmologie arbeiten auf sehr großen Längenskalen. Dabei kann die Astronomie auf eine über Jahrtausende währende Forschungsgeschichte zurückblicken, die in den antiken Zivilisationen ihren Anfang nimmt (vgl. Grupen (2018), S. 2). Schon die alten Griechen studierten den Himmel, nutzten Sternbilder zur Navigation und prägten wichtige Begriffe, wie den Begriff des Planeten – übersetzt mit Wanderer (vgl. Planetarium Wolfsburg). Über die Jahrhunderte hinweg konnten viele neue Erkenntnisse gewonnen werden, wie zum Beispiel die Beschreibung des heliozentrischen Weltbildes durch Galilei oder der ellipsenartigen Planetenbahnen durch Kepler. In der heutigen Zeit ist man in der Lage den kompletten Lebenszyklus von Sternen, deren elementare Zusammensetzung sowie die Prozesse der Energiegewinnung in den Kernen der Sterne nachzuvollziehen. Durch den Einfluss von Theorien und Erkenntnissen aus anderen Teilgebieten der Physik entwickelte sich die Astronomie stetig weiter (vgl. Grupen (2018), S. 4) und auch heute arbeiten viele Wissenschaftler\*innen in diesem Forschungszweig.

Die Kosmologie bildet dahingehend einen eher modernen Forschungszweig. Seit der von Hubble entdeckten Rotverschiebung bei der Betrachtung anderer Galaxien und der Schlussfolgerung, dass sich das Universum immer weiter ausdehnt (vgl. Grupen (2018), S. 242), wurde das Standardmodell der Kosmologie im 20. Jahrhundert entwickelt und weiter ausgebaut.

## Standardmodell der Kosmologie

Das Standardmodell der Kosmologie, oftmals auch Urknall-Theorie genannt, beschreibt einen theoretischen Ansatz, wie sich das Universum seit dessen Entstehung entwickelt hat. Dabei decken sich viele Aussagen des Modells mit mannigfaltigen Beobachtungen der Wissenschaftler\*innen (vgl. Louis (2021), S. 6ff.), weshalb es der standardisierte Ansatz zur Beschreibung des Universums ist. Folglich hat der Begriff des Urknalles auch über Medien und andere Kanäle in die Erfahrungswelt der Schüler\*innen Einzug gefunden.

Bevor zur Beschreibung der Grundaussagen des Modells übergegangen wird, sollen zunächst dessen Grenzen aufgezeigt werden. Der „Urknall“ kennzeichnet zwar den Beginn des Universums, jedoch kann die Zeitspanne vom Zeitpunkt des „Big Bang“ bis  $10^{-10}$  s nach dem Urknall aus zwei Gründen mit dem heutigen Wissensstand nicht beschrieben werden (vgl. Louis (2021), S.25). Der erste Grund liegt darin begründet, dass sich der Urknall nicht über die Allgemeine Relativitätstheorie beschreiben lässt, da die Raumkrümmung divergiert (vgl. Louis (2021), S.25). Der andere Grund liegt in dem Standardmodell der Elementarteilchen (auf das im Anschluss eingegangen wird) und dessen Gültigkeitsbereich. Die Beschreibung von Elementarteilchen über das Standardmodell und die fundamentalen Wechselwirkungen erfolgt in einem gewissen Rahmen, der von der Energie dieser Teilchen abhängig ist. Elementarteilchen können nur beschrieben werden, wenn deren Energie einige 100 GeV (Gigaelektronenvolt) oder weniger beträgt; für höhere Energien existieren keine empirisch belegten Versuche (vgl. Louis (2021), S.25). Folglich kann man zur frühen Phase des Universums nur theoretische Überlegungen formulieren, was sich schließlich ab dem bereits genannten Zeitpunkt von  $10^{-10}$  s ( die approximative Lösung der Einstein-Gleichung) ändert (vgl. Louis (2021), S. 25). Ab diesem Zeitpunkt kann die Entwicklung des Kosmos mit den heute bekannten physikalischen Gesetzen und Theorien nachvollzogen werden (vgl. Louis (2021), S.25).

Beginnend mit dem Zeitpunkt von  $10^{-10}$ s nach dem Urknall und der stattfindenden Expansion liegen die Materie und die fundamentalen Wechselwirkungen in einem Zustand vor, welcher als „Quark-Gluon-Plasma“ bezeichnet wird (vgl. Louis (2021), S.26). Mit dem stetigen Abkühlen und Ausdehnen des Universums folgt dann das Besetzen gebundener und

energetisch günstiger Zustände, worunter auch die Bildung von Protonen und Neutronen fällt (vgl. Grupen (2018), S. 239f.). Es findet ein sogenannter Phasenübergang statt, da ab ca.  $10^{-4}$  s die anziehende Kraft der Gluonen, auch als starke Wechselwirkung bekannt, die Wärmebewegung der einzelnen Quarks, welche als mittlere kinetische Energie dieser Elementarteilchen aufgefasst werden kann, überwindet (vgl. Louis (2021), S. 26). Daraufhin erfolgt die Bildung der leichten Atomkerne, also der Kerne von Wasserstoff und Helium, in einem Verhältnis von 9:1 (vgl. Louis (2021), S. 26). In der Tat konnte diese Verteilung gemessen werden, was als ein Beleg für das Standardmodell der Kosmologie gewertet werden kann (vgl. Louis (2021), S. 26). Jedoch besitzt das Modell auch in dieser Phase Grenzen. Laut dem Standardmodell der Elementarteilchen existiert für jedes Teilchen ein Antiteilchen, welche nach wissenschaftlichen Vermutungen zu Beginn des Universums im gleichen Verhältnis existiert haben (vgl. Louis (2021), S. 26). Heutigen Beobachtungen nach ist dieses Verhältnis jedoch stark zugunsten der Teilchen gekippt, was man auf einen Mechanismus in diesem Anfangsstadium zurückführt, welcher Teilchen gegenüber Anti-Teilchen bevorzugte (vgl. Louis (2021), S. 26, vgl. Grupen (2018), S. 240). Die Urknall-Theorie liefert dafür keinen Erklärungsansatz.

Das nächste einen starken Einfluss nehmende Event findet nach weiteren 370.000 Jahren statt. Zu diesem Zeitpunkt wird der Einfluss der elektromagnetischen Wechselwirkung gegenüber der Temperatur dominant und es bilden sich Atome (vgl. Louis (2021), S. 27). Bis zu diesem Zeitpunkt konnte sich elektromagnetische Strahlung nicht frei ausbreiten, ab diesem Zeitpunkt jedoch wird das Universum praktisch durchsichtig für diese Art von Strahlung. Die 1964 von A. Penzias und R. Wilson entdeckte kosmische Hintergrundstrahlung weist dabei eine Temperatur von 2,7 K und eine maximale Intensität im Mikrowellenbereich auf (vgl. Louis (2021), S. 27). Auch diese liefert einen starken Hinweis auf die Gültigkeit der Urknall-Theorie welcher im Folgenden beschrieben wird: die beinahe isotrope Verteilung dieser elektromagnetischen Strahlung. In der Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung sind kleine Temperaturschwankungen zu erkennen, welche für die Ausbildung der im Universum bestehenden Strukturen verantwortlich sind (vgl. Louis (2021), S. 27). Die gemessenen Temperaturfluktuationen bedingen Energie- und Materiefluktuationen, die von der Gravitationskraft verstärkt werden, wodurch sich zunehmend Materieklumpen bilden (vgl. Louis (2021), S. 27). Diese Klumpen entwickeln sich

durch die fortlaufende Expansion zu großräumigen Strukturen. Belegt wurde die Anisotropie beispielsweise durch die Experimente COBE 1999, WMAP und PLANCK (vgl. Louis (2021), S. 27).

Allein mit der kosmischen Hintergrundstrahlung kann die Entwicklung der sichtbaren Strukturen jedoch nicht nachvollzogen werden (vgl. Louis (2021), S. 28). Es muss also eine weitere Form von Materie existieren, welche allerdings nicht sichtbar, aber dennoch für die entstandenen Strukturen verantwortlich ist: die dunkle Materie. Diese Art der Materie wechselwirkt zwar über die Gravitation, jedoch über keine der drei anderen Wechselwirkungen, ebenso wenig sendet sie Licht aus (vgl. Louis (2021), S. 29). Jedoch gibt es verschiedene Theorien und Annahmen über die dunkle Materie, diese reichen von der Postulation eines neuen Elementarteilchens bis zu sogenannten WIMPs. Es existieren neben der Strukturverteilung jedoch zwei weitere starke Belege für die Existenz dieser Art von Materie. Dazu zählen die Bewegung der Randgebiete in Spiralgalaxien (diese bewegen sich mit einer wesentlich höheren Geschwindigkeit als vorher angenommen) sowie Gravitationslinsen (vgl. Louis (2021), S. 28f.).

Auch die Entstehung von Sternen, welche rekonstruierbar ist, das Vorhandensein von schwarzen Löchern und von Gravitationswellen sind weitere Belege für das Standardmodell der Kosmologie (vgl. Louis (2021), S. 29ff.). Insgesamt lässt sich festhalten, dass es möglich ist über das Standardmodell der Kosmologie die Geschichte des Kosmos vom jetzigen Zeitpunkt bis zu  $10^{-10}$ s nach dem Urknall nachzuvollziehen. Annahmen, welche dabei getroffen werden müssen, sind die Baryogenese, also der Mechanismus, welcher das vermehrte Vorhandensein von Teilchen gegenüber Anti-Teilchen beschreibt (vgl. Louis (2021), S. 31), die dunkle Materie sowie die dunkle Energie, welche die beschleunigte Expansion des Universums erklärt. Die Grundlagen für diesen Meilenstein der Physik liegen in den Gesetzen der Teilchenphysik, der Quantentheorie sowie Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (vgl. Louis (2021), S. 31).

## Standardmodell der Elementarteilchen

Neben der Astronomie und der Kosmologie legt die Teilchenphysik das Fundament für die Astroteilchenphysik. Für die Teilchenphysik ist das sogenannte Standardmodell der Elementarteilchen von großer Bedeutung. Das Standardmodell der Elementarteilchen (Teilchen ohne Substruktur) ist eine Quantenfeldtheorie, bildet die fachliche Grundlage der Teilchenphysik und fasst die in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts im Bereich der Teilchenphysik gemachten Entdeckungen zusammen (vgl. Lindenau (2015), S. 3). Die Grundlagen für dieses Modell bilden die in den 1950ern formulierten Eichtheorien, woraufhin die Entwicklung des Standardmodells in den 1960er und 70er Jahren folgte (vgl. Lindenau (2015), S. 3). Anschließend wurde dieses Modell immer wieder experimentell überprüft und bestätigt (vgl. Louis (2021), S. 17). Es ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

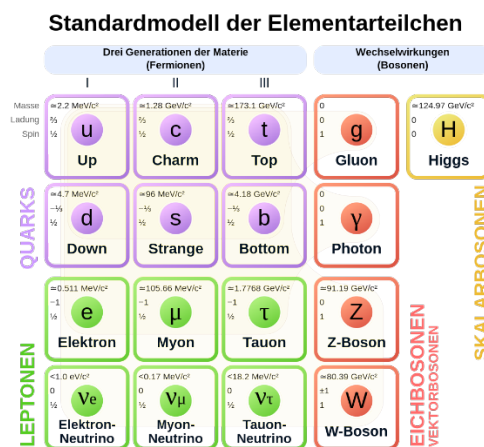


Abbildung 1: Standardmodell der Elementarteilchen.

Das Standardmodell unterscheidet zwischen sogenannten Fermionen, also Teilchen mit einem halbzahligen Spin, und Bosonen (Teilchen mit einem ganzzahligen Spin). Dabei können die Fermionen noch einmal in Quarks und Leptonen unterschieden werden. Diese bilden die uns bekannte Materie im Universum. Die Fermionen lassen sich in drei sogenannte Teilchengenerationen unterscheiden (vgl. Kobel et al. (2022), S. 62f.). Für das Betrachten der Teilchenphysik auf schulischer Ebene sind jedoch vor allem Fermionen aus der ersten Teilchengeneration von Bedeutung, da, up- und down-Quarks die stabile Materie, also Protonen und Neutronen, formen. Auch das Elektron bildet einen Bestandteil der stabilen Materie und ist ebenfalls ein Teilchen der ersten Generation. Die zweite und dritte Generation



unterscheiden sich vor allem in der Masse der Elementarteilchen von der ersten (vgl. Kobel et al. (2022), S. 63). Teilchen der dritten Generation sind am massereichsten, Elementarteilchen der ersten am masseärmsten. Aufgrund der hohen Masse sind Fermionen der zweiten und dritten Generation jedoch nicht stabil und zerfallen nach kurzer Zeit.

Neben den Materieteilchen, den Fermionen, existieren die sogenannten Bosonen, auch Wechselwirkungs- oder Botenteilchen genannt. Diese vermitteln die sogenannten fundamentalen Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen (vgl. Louis (2021), S. 21). Das Standardmodell der Elementarteilchen beschreibt insgesamt vier fundamentale Wechselwirkungen: die elektromagnetische Wechselwirkung, die schwache und die starke Wechselwirkung/Kernkraft sowie die Gravitation (vgl. Louis (2021), S. 18). Für jede dieser vier fundamentalen Wechselwirkungen soll mindestens ein solches Botenteilchen existieren, für drei der vier Wechselwirkungen wurden diese bereits nachgewiesen. Dazu zählen das Photon als Wechselwirkungsteilchen für den Elektromagnetismus, W- und Z-Bosonen als Wechselwirkungsteilchen für die schwache Wechselwirkung und das Gluon für die starke Kernkraft (vgl. Louis (2021), S. 21). Einzig bei der Gravitation konnte kein solches Teilchen gemessen werden, aber es existieren theoretische Modelle, welche ein sogenanntes „Graviton“ postulieren (vgl. Grupen (2018), S. 30).

Weiterhin existiert für jede fundamentale Wechselwirkung neben dem Botenteilchen eine entsprechende Ladung. Damit Elementarteilchen an einer bestimmten Wechselwirkung teilnehmen, müssen sie die entsprechende Ladung besitzen, zum Beispiel nimmt das Elektron an der elektromagnetischen Wechselwirkung teil, weil es elektrisch einfach negativ geladen ist. Neutrinos haben keine elektrische Ladung bzw. sind neutral geladen und nehmen deshalb nicht an dieser Wechselwirkung teil. Neben der elektrischen Ladung existieren die schwache Ladung, auch als schwacher Iso-Spin betitelt und die starke Ladung bzw. Farbladung. Diese Ladungen haben nicht immer einen skalaren Charakter, die Farbladung wird beispielsweise über sogenannte Farbvektoren dargestellt.

Geht man nun zur konkreten Beschreibung einer Wechselwirkung zwischen zwei Elementarteilchen über, so geschieht dies folgendermaßen. Entsprechend der Quantenfeldtheorie befinden sich beide Teilchen in einem Kraftfeld, der Austausch erfolgt

über ein Boson, welches von einem der beiden Teilchen ausgesandt und vom anderen Elementarteilchen empfangen wird. Das Aufeinanderwirken von Elementarteilchen lässt sich durch Feynman-Diagramme beschreiben. Feynman-Diagramme visualisieren in Form eines zweidimensionalen Ort-Zeit-Diagramms die Wechselwirkung / Interaktion zwischen Elementarteilchen (vgl. Kobel et al. (2022), S. 49f.). In der folgenden Abbildung ist das Feynman-Diagramm für die Umwandlung eines Myons in ein Elektron und zwei Neutrinos dargestellt.

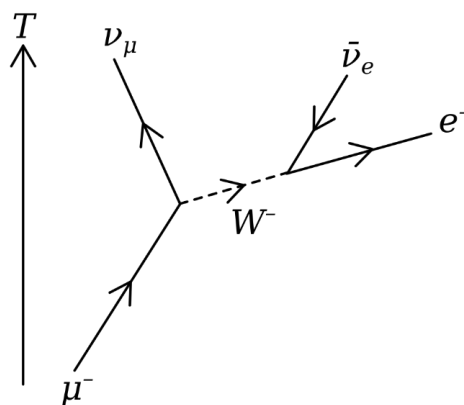


Abbildung 2: Myon-Umwandlung.

Die von Richard Feynman entwickelten Diagramme dienen jedoch nicht nur zur Veranschaulichung wichtiger Prozesse in der Teilchenphysik, es gelten ebenfalls klare Regeln in diesen Diagrammen (vgl. Lindenau (2015), S. 15). Als erstes kann die Diagrammdimension betrachtet werden. Wie bereits beschrieben sind Feynman-Diagramme zweidimensional. Daraus folgt, dass die Bewegung von Teilchen nur in einer Ortsdimension veranschaulicht wird. Eine Unterscheidung der verschiedenen Teilchentypen ist anhand der verschiedenen Arten von Linien möglich. Teilchen bzw. Anti-Teilchen werden durch Geraden dargestellt, welche mit Pfeilen versehen werden. Anhand der Richtung des Pfeils kann ein Teilchen vom Anti-Teilchen unterschieden werden. Zusätzlich werden die Linien mit den entsprechenden Teilchen-Symbolen beschriftet. Wichtig ist zu betonen, dass die Linien nicht die Bahnkurven des Teilchens darstellen, aus der Länge dieser Linien kann jedoch eine Komponente des Geschwindigkeitsvektors der Teilchen abgeschätzt werden (vgl. Lindenau (2015), S. 16).

Des Weiteren existieren sogenannte Vertices, im Singular Vertex genannt, bei denen es sich um Punkte handelt, an denen sich die Linien der Elementarteilchen treffen (vgl. Lindenau

(2015), S. 17). Sie beschreiben das Vorhandensein einer Wechselwirkung, zum Beispiel durch das Aussenden oder Absorbieren eines Botenteilchens durch ein Elementarteilchen, zwischen eben diesen elementaren Bausteinen (vgl. Kobel et al. (2022), S. 50f.). Die in Feynman-Diagrammen dargestellten Botenteilchen werden nicht durch gerade Linien beschrieben, sondern durch Spiralen (Gluon) oder sinusartige Strukturen (Photon, W-, Z-Boson). Am Punkt eines Vertex gilt Ladungs- und Impulserhaltung. Die Anzahl der in einem Feynman-Diagramm vorkommenden Vertices lässt ebenso Rückschlüsse über die Wahrscheinlichkeit des dargestellten Prozesses zu (vgl. Lindenau (2015), S. 18). Allgemein gilt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Prozesses mit der zunehmenden Anzahl an Vertices fällt (vgl. Lindenau (2015), S. 19). Für die exakte Berechnung einer Wahrscheinlichkeit für beobachtbare teilchenphysikalische Prozesse müssen alle Feynman-Diagramme mit demselben Anfangs- und Endzustand betrachtet werden. Dabei wird der Begriff der niedrigsten Ordnung als ein Diagramm mit der minimalen Anzahl an vorkommenden Vertices definiert (vgl. Lindenau (2015), S. 19).

Als letztes bisher noch nicht betrachtetes Teilchen existiert das Higgs-Boson im Standardmodell der Elementarteilchen. Nachdem es im 20. Jahrhundert vom Physiker P. Higgs postuliert wurde, konnte es im Jahre 2012 am LHC nachgewiesen werden (vgl. Louis (2021), S. 22). Das Higgs-Teilchen vervollständigt das Standardmodell der Elementarteilchen. Trotz der Tatsache, dass es in die Kategorie der Bosonen fällt und über ein Feld, das Higgs-Feld, wirkt, handelt es sich bei diesem Teilchen nicht um ein Austauscheteilchen einer Wechselwirkung. Die anderen Elementarteilchen erhalten über die Interaktion mit dem Higgs-Feld und dem Higgs-Boson ihre Masse, eine fundamentale Eigenschaft der Elementarteilchen, die vor Nachweis des Higgs-Teilchen nicht erklärt werden konnte.

Zum Schluss ist noch anzumerken, dass zu jedem der im Standardmodell vorkommenden Teilchen ein sogenanntes Antiteilchen existiert. Diese besitzen die gleiche Masse, haben jedoch entgegengesetzte Ladungszahlen. Als Vertreter dieser Teilchenart kann das Positron benannt werden, das Antiteilchen des Elektrons.

### **2.1.2 Kosmische Strahlung und Myonen**

Die von Victor Hess entdeckte und von ihm benannte kosmische Strahlung stellt einen wichtigen Untersuchungsgegenstand in der Astroteilchenphysik dar. Bei dieser Strahlungsart handelt es sich um eine hochenergetische Teilchenstrahlung, welche durch die Sonne, galaktische und extragalaktische Quellen erzeugt wird (vgl. Karg et al. (2021), S. 24). Diese aus dem Weltall kommenden primären Teilchen, die mitunter Energien aufweisen, die zehn Millionen Mal größer sind als die Energien von Teilchen im LHC (vgl. Karg et al. (2021), S. 11), treffen auf die Erdatmosphäre und wechselwirken dabei mit den Atomkernen der Luftmoleküle (vgl. Karg et al. (2021), S. 22). Durch das Zusammenstoßen dieser Teilchen zerfällt die primäre kosmische Strahlung und es wird so eine gigantische Anzahl sekundärer Teilchen, auch Teilchenschauer genannt, erzeugt (vgl. Karg et al. (2021), S. 22). Diese Schauer können durch verschiedene Experimente erfasst und deren Eigenschaften untersucht werden, wodurch Prozesse in Sternen, Galaxien oder auf der Größenskala des gesamten Universums besser verstanden werden können.

#### **Entdeckung der kosmischen Strahlung**

Um die Entdeckungsgeschichte der kosmischen Strahlung zu skizzieren, bietet es sich an mit der Entdeckung der Röntgenstrahlen im Jahre 1895 zu beginnen. Dieses Ereignis sorgte in den folgenden Jahren für eine Kettenreaktion an weiteren Entdeckungen, worunter ebenfalls die Entdeckung der Radioaktivität 1896 und die Entdeckung des Elektrons durch Thomson im Jahre 1897 zählen (vgl. Grupen (2018), S. 4). Nachdem in der Astronomie ausschließlich Entdeckungen über das Licht im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums gemacht wurden, deutete sich zu dieser Zeit eine Verschmelzung der Astronomie und der Teilchenphysik an (vgl. Grupen (2018), S. 4). Zwischen 1900 und 1910 fanden mehrere Untersuchungen zu den Eigenschaften und des Ursprungs der radioaktiven Strahlung statt. Nachdem Wulf im Jahre 1910 auf dem Eiffelturm eine geringe Strahlungsbelastung gemessen hatte, schien der terrestrische Ursprung dieser ionisierenden Strahlung bestätigt worden zu sein (vgl. Grupen (2018), S. 4).

Um die von Wulf gewonnenen Ergebnisse zu bestätigen, führte Victor Hess in den zwei folgenden Jahren, also 1911 und 1912, sein Experiment durch (vgl. Grupen (2018), S. 4). Er beabsichtigte, mit einem Ballon in große Höhen aufzusteigen und dabei die in dieser Höhe herrschende Strahlungsbelastung zu messen, die seiner Erwartung nach mit steigender Flughöhe immer weiter abnehmen sollte. Als tatsächliches Ergebnis der in einer Höhe von fünf Kilometern durchgeführten Messungen ergab sich jedoch das genaue Gegenteil – die Strahlungsbelastung stieg in dieser Höhe enorm an. Hess schlussfolgerte daraufhin, dass es neben der radioaktiven Strahlung terrestrischen Ursprungs noch eine weitere Strahlungsart, bestehend aus elektrisch geladenen Teilchen, geben musste, deren Ursprung im Weltall lag (vgl. Grupen (2018), S. 4). Er taufte diese Strahlungsart Höhenstrahlung. Nach der Bestätigung der Messergebnisse durch Kohlhörster 1914 wurde Hess für diese Entdeckung im Jahre 1936 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet (vgl. Grupen (2018), S. 4).

### **Nachweismöglichkeiten für die kosmische Strahlung**

Da die zu konzipierende Unterrichtseinheit und vor allem die Arbeitsphase mit Cosmic@Web auf Experimenten zur kosmischen Strahlung aufbaut, müssen an dieser Stelle ebenfalls mögliche Nachweismethoden für die kosmische Strahlung und speziell für Myonen erörtert werden. Aufgrund des großen Themenumfangs bei der näheren Betrachtung der physikalischen Hintergründe der verschiedenen Nachweisinstrumente wird sich an dieser Stelle auf das Beschreiben der Grundlagen beschränkt.

Der Nachweis elektrisch geladener Teilchen, was Myonen als Hauptbestandteil der sekundären kosmischen Strahlung einschließt, konnte im 20. Jahrhundert mit der im Jahre 1912 von Wilson entwickelten Nebelkammer erfolgen (vgl. Grupen (2018), S. 4). Bei der Nebelkammer handelt es sich um einen mit übersättigtem Alkoholdampf gefüllten Behälter, welcher die Spuren ionisierender Teilchen durch Nebelschleier sichtbar macht (vgl. Karg et al. (2021), S. 12). Die Wirkungsweise dieses Detektors, für dessen Entwicklung Wilson 1927 mit dem Nobelpreis geehrt wurde (vgl. Grupen (2018), S. 4), lässt sich auf die Alkohol-Moleküle zurückführen. Diese liegen in einem gasförmigen Zustand vor, der durch die Übersättigung einem Nebel gleicht. Trifft nun ein elektrisch geladenes Teilchen, zum Beispiel ein Myon oder Elektron, auf ein Alkohol-Molekül, so wird dieses Molekül ionisiert, indem zum Beispiel ein

Elektron aus der Hülle geschlagen wird (vgl. Karg et al. (2021), S. 12). Der ionisierte Alkohol kondensiert daraufhin, es bilden sich also Flüssigkeitstropfen und der dadurch entstehende Nebelstreifen gibt die Spur des ionisierenden Teilchens an (vgl. Karg et al. (2021), S. 12). Auch Teilchenumwandlungen, wie die Umwandlung des Myons in ein Elektron und die dazugehörigen Neutrinos, können in der Nebelkammer beobachtet werden (vgl. Karg et al. (2021), S. 13), diese sind jedoch vergleichsweise selten. An dieser Stelle muss noch erwähnt werden, dass die Nebelkammer nur für den Nachweis elektrisch geladener Teilchen genutzt werden kann. Neutrinos können, da sie elektrisch neutral geladen sind, nur indirekt über die Impulserhaltung bei Umwandlungsprozessen nachgewiesen werden.

Obwohl Nebelkammern in der heutigen Zeit immer noch zum Nachweis der kleinsten Bausteine des Universums genutzt werden, sind im Bereich der Astroteilchenphysik andere Nachweisinstrumente, sogenannte Szintillatoren, in den Vordergrund gerückt (vgl. Karg et al. (2021), S. 14). Ein Szintillator ist ein Stoff im festen oder flüssigen Aggregatzustand, welcher beim Durchgang von energiereichen Photonen oder elektrisch geladenen Teilchen zu leuchten beginnt. Dies geschieht aufgrund der Anregung der Szintillator-Moleküle durch Stoßprozesse mit den elektrisch geladenen Teilchen (vgl. Grupen (2018), S. 75f.). Beim Abregen senden die Moleküle Energie in Form von Photonen aus, welche von Messgeräten erfasst und ausgewertet werden können. Über Szintillatoren kann zum Beispiel die Umwandlung eines Myons indirekt beobachtet (vgl. DESY-LiDO-Experiment) oder über Szintillationszähler die Myonenrate erfasst werden (vgl. DESY-CosMO-Mühle).

Die kosmische Strahlung kann ebenfalls über den sogenannten Tscherenkow-Effekt (engl. Cherenkov) nachgewiesen werden. Dieser tritt ein, wenn sich Teilchen, wie zum Beispiel Myonen, mit einer Geschwindigkeit, welche größer als die Lichtgeschwindigkeit des optischen Mediums ist, durch dieses optische Medium bewegen (vgl. Grupen (2018) S. 71). Dies bewirkt das Aussenden von Photonen im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (vgl. Grupen (2018) S. 71), welche durch Photomultiplier in elektrische und für einen Computer auswertbare Signale umgewandelt werden. Typische Detektoren sind zum Beispiel Wasser-Tscherenkow-Detektoren (vgl. Grupen (2018), S. 73). Ein typisches Beispiel für das Vorhandensein von Tscherenkow-Strahlung ist das blaue Leuchten in einem Abklingbecken

eines Kernkraftwerks. Das Frequenz-Spektrum kann dabei über die Frank-Tamm-Formel ausgedrückt werden:

$$\frac{d^2E}{dx d\omega} = \frac{q^2}{4\pi} \mu(\omega) \omega \left( 1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right)$$

Für ein Teilchen mit der elektrischen Ladung  $q$  wird die Energiemenge pro Wegelement  $dx$  pro Frequenzabschnitt  $d\omega$  dargestellt. Diese weiteren Größen sind in der Formel vertreten:

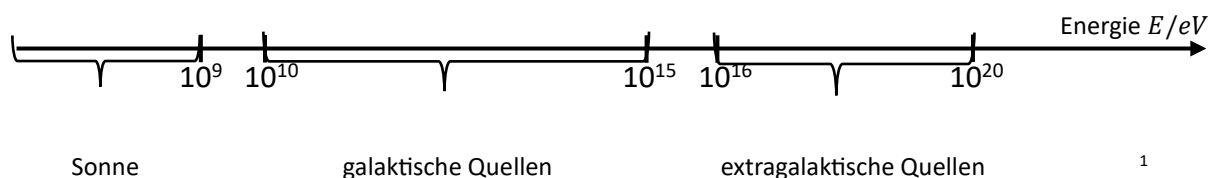
$\mu(\omega)$ ... frequenzabhängige magnetische Permeabilität

$n(\omega)$ ... frequenzabhängige Brechungsindex des optischen Mediums

$v$ ... Geschwindigkeit des Teilchens

### Primäre und sekundäre Strahlung

Die kosmische Strahlung kann in primäre und sekundäre Strahlung unterschieden werden. Als Quellen für primäre kosmische Teilchen werden dabei die Sonne, galaktische Quellen, wie zum Beispiel Pulsare, Doppelsternsysteme oder Druckwellen von Supernovae, welche als Beschleuniger dienen, und extragalaktische Quellen, wie aktive Galaxienkerne, genannt (vgl. Karg et al. (2021), S. 24). Die Zuordnung der Quellen erfolgt anhand der Energie der primären Strahlung (vgl. Karg et al. (2021), S. 24).



Dabei ist anzumerken, dass die hochenergetischen kosmischen Teilchen weit höhere Energien aufweisen, als durch Teilchenbeschleuniger erzeugte Teilchen (vgl. Karg et al. (2021), S. 11). Bis heute ist unklar, welche Beschleunigungsmechanismen für diese hohen Energien verantwortlich sind (vgl. Karg et al. (2021), S. 11).

<sup>1</sup> Diese Übersicht wurde vom Autor erstellt. Die Energiewerte wurden aus folgender Quelle entnommen: Karg et al. (2021), S. 24.

Die primäre kosmische Strahlung besteht zu einem kleinen Teil aus Elektronen und zu einem großen Teil aus Atomkernen, was Protonen,  $\alpha$ -Teilchen und schwerere Kerne miteinschließt (vgl. Grupen (2018), S: 198). Bei all diesen Teilchen handelt es sich um elektrisch geladene Teilchen. Dies sorgt dafür, dass sich die Suche nach Quellen kosmischer Strahlung schwierig gestaltet, da die primären Teilchen auf ihrem Weg durch den Kosmos durch elektrische und magnetische Felder abgelenkt werden können (vgl. Karg et al. (2021), S.24). Auf bewegte, elektrisch geladene Teilchen wirkt die Lorentz-Kraft, welche über die folgende Formel beschrieben werden kann:

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_B = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

In dieser Formel sind sowohl die elektrische als auch die magnetische Komponente der Lorentz-Kraft enthalten. In den Schullehrbüchern beschränkt man sich in der Regel auf die Betrachtung der magnetischen Komponente. Die elektrische Komponente wird dort gesondert betrachtet und als Coulomb-Kraft bezeichnet.

Neben den bereits aufgezählten geladenen Teilchen treffen auch Neutrinos und elektromagnetische Strahlung, wie zum Beispiel Gamma- oder Röntgen-Photonen auf die Erdatmosphäre (vgl. Grupen (2018), S. 198). Dabei liefern die unterschiedlichen Komponenten der primären Strahlung auch verschiedene Informationen. Durch die elektrisch geladenen Teilchen kann die chemische Zusammensetzung der Strahlung analysiert werden, während die hochenergetischen Photonen die Identifikation von Quellen ermöglichen (vgl. Grupen (2018), S. 198). Dabei kann einerseits die Oberfläche der Quellen untersucht oder durch Neutrinos ins Innere der Teilchenerzeuger „gesehen“ werden (vgl. Grupen (2018), S. 198).

Probleme der aktuellen wissenschaftlichen Forschung liegen in dem Ermitteln der chemischen Zusammensetzung der primären Strahlung. Weltraumexperimente lassen dabei nur Aussagen über Teilchen mit einer Energie von höchstens 1 TeV zu (vgl. Grupen (2018), S. 238). Bei noch größeren Energien greift man auf Luftschauer zurück. Diese werden im Folgenden beschrieben. Jedoch kann anhand dieser Methode nur zwischen Eisen- und Wasserstoffkernen unterschieden werden (vgl. Grupen (2018), S. 238).



Trifft nun die primäre kosmische Strahlung auf die Erdatmosphäre, so wechselwirken die primären Teilchen mit den Luftmolekülen. Dies sorgt dafür, dass die eben genannten Teilchen einen Großteil ihrer Energie verlieren, worauf sich diese in sogenannte Sekundärteilchen umwandeln (vgl. Karg et al. (2021), S. 22). Besonders bei hohen Energien von über 100 GeV der primären Teilchen / der  $\gamma$ -Quanten bilden sich Teilchenschauer /-kaskaden in der Erdatmosphäre (vgl. Grupen (2018), S. 238). Zu beachten ist, dass je nach Art des primären Teilchens unterschiedliche sekundäre Teilchen entstehen, die unterschiedlich schnell von den Luftmolekülen gestreut oder absorbiert werden. Durch Messungen auf Meereshöhe stellt man fest, dass am Erdboden Myonen einen hohen Anteil der sekundären Strahlung ausmachen (vgl. Grupen (2018), S. 238). Myonen machen ca. 80% der sekundären Teilchen aus und bilden dementsprechend den Hauptbestandteil der messbaren sekundären Strahlung und können aufgrund ihres großen Durchdringungsvermögens auch unter der Erde gemessen werden (vgl. Grupen (2018), S. 238). Die Entstehung eines Teilchenschauers ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

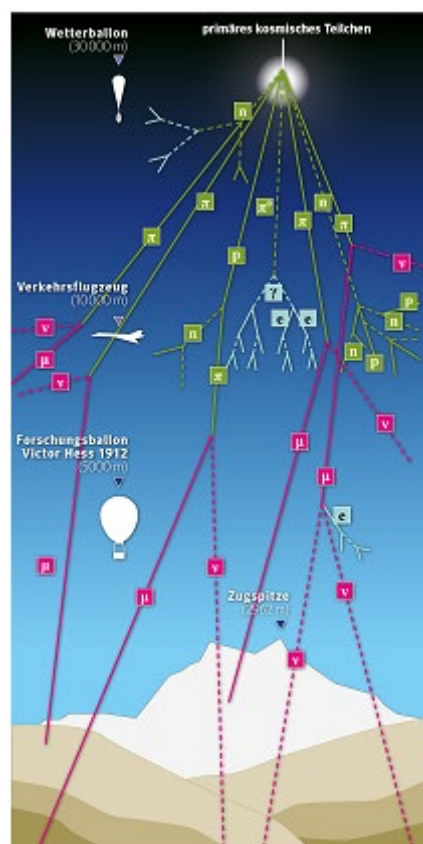


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Teilchenschauers.

Anhand der Abbildung wird ersichtlich, dass sich aus einem primären kosmischen Teilchen durch die Umwandlungsprozesse ein Teilchenschauer bildet, welcher aus mehreren Millionen von Sekundärteilchen besteht und eine Fläche von mehreren Quadratkilometern bedecken kann (vgl. Karg et al. (2021), S. 22f.). Der Nachweis eines solchen Teilchenschauers (und der Myonen) gelingt über die vorher beschriebenen Messinstrumente, wie zum Beispiel Szintillatoren (vgl. Karg et al. (2021), S. 14), Wasser-Tscherenkow-Detektoren (vgl. Grupen (2018), S. 73), Fluoreszenzdetektoren (vgl. Grupen (2018), S. 238) etc.

### **Physikalische Größen zur Beschreibung von Myonen**

Um die kosmische Strahlung und Myonen angemessen zu beschreiben und zu charakterisieren benötigt man ein Grundverständnis verschiedener physikalischer Größen. Dieser Abschnitt soll dabei einen Überblick über diese Größen geben. Es bietet sich an, die Energie von Myonen und generell von Elementarteilchen nicht über die klassische Einheit Joule (J) zu beschreiben, sondern Elektronenvolt (eV) als neue Einheit der Energie zu gebrauchen. Anschaulich beschrieben entspricht 1 eV der Energiemenge, welche ein Elektron erfährt, wenn es mit einer Potenzialdifferenz von 1 Volt beschleunigt wird. Da sich Myonen mit 99% der Vakuumlichtgeschwindigkeit bewegen, nutzt man neben der neuen Einheit für die Energie, abgeänderte und aus der Relativitätstheorie stammende Formeln zur Berechnung von Masse und Impuls. Man definiert den Lorentzfaktor folgendermaßen:  $\gamma = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

Es ergibt sich für die Energie:  $E = \gamma mc^2$  ( $c$  ist dabei die Vakuumlichtgeschwindigkeit). Als Einheit für die Masse eines Elementarteilchens folgt durch Umstellen  $\frac{eV}{c^2}$ . Durch die Nutzung sogenannter natürlicher Einheiten wird die Einheit der Masse auf eV reduziert. In astroteilchenphysikalischen Experimenten spielen weitere Größen eine zentrale Rolle. Darunter fallen beispielsweise die klassischen Größen des Einfallswinkels und der Myonenrate. Die Myonenrate gibt dabei die Anzahl der gemessenen Myonen / Ereignisse in einem normierten Zeitintervall wieder, wird also in der Einheit  $\frac{1}{h}$  (Anzahl pro Stunde) angegeben. Der Einfallswinkel wird in der Einheit Grad (°) wiedergegeben. Hier ist zu

beachten, dass der senkrechte Einfall mit  $\alpha = 0^\circ$  definiert wird. Je größer der Absolutbetrag des Einfallswinkels wird, desto flacher fallen Myonen auf den Detektor ein.

Die letzte Größe, die an dieser Stelle vorgestellt werden soll, bezeichnet die mittlere Lebensdauer von Myonen. Myonen stammen aus der zweiten Teilchengeneration der Leptonen, besitzen also eine endliche Lebensdauer bevor sie zerfallen / sich umwandeln (siehe Abbildung 2). Der Zerfall eines Myons erfolgt jedoch nicht nach einer festdefinierten Zeitspanne, analog zum radioaktiven Zerfall handelt es sich bei der Umwandlung von Myonen um einen statistischen Prozess, woraus folgt, dass keine genauen Aussagen über ein einzelnes Myon getroffen werden können. Bei der Betrachtung einer großen Anzahl kann jedoch die Größe der mittleren Lebensdauer  $\tau$  genutzt werden, um ein Zeitintervall zu definieren, in dem ein bestimmter Anteil der Myonen zerfällt (analog zur Halbwertszeit für radioaktive Isotope). Der Zerfallsprozess von Myonen kann über die folgende Formel beschrieben werden:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

In der Formel vorkommende Größen:

$N(t)$ ... Anzahl der Myonen zum Zeitpunkt  $t$

$N_0$ ... Anzahl der Myonen zum Zeitpunkt  $t = 0s$

$\lambda$ ... Zerfallskonstante

$t$ ... Zeit

Aus der Zerfallskonstante kann die mittlere Lebensdauer berechnet werden. Es gilt:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

### 2.1.3 Schülervorstellungen

Die Astroteilchenphysik ist bisher im schulischen Kontext kaum vertreten, weshalb die entsprechende Fachliteraturdichte überaus gering ist. Dennoch lassen sich Schülervorstellungen aus anderen Teilgebieten der Physik auf diese Thematik übertragen. Grund dafür ist das gleiche zugrundeliegende physikalische Denkgerüst. Zum Beispiel bauen sowohl die Astroteilchenphysik als auch die Radioaktivität, welche im schulischen Kontext in

Klasse 9 unterrichtet wird, auf den Erkenntnissen des Standardmodells der Elementarteilchen auf. Da sich diese beiden Forschungszweige in ihren Grundzügen ähneln, können dort verortete Lernendenvorstellungen analog auf die Astroteilchenphysik übertragen werden. In den folgenden Absätzen werden diese Vorstellungen erläutert, damit in Kapitel 5 Methoden und Strategien zu deren Bewältigung, die im Unterrichtskonzept Verwendung finden, aufgezeigt sowie erklärt werden können.

Wie bereits beschrieben handelt es sich bei der Umwandlung von Elementarteilchen und im speziellen bei der Umwandlung von Myonen um statistische Prozesse. Folglich führt man die physikalische Größe der mittleren Lebensdauer ein, welche die Zeit beschreibt, in der sich ein bestimmter Anteil der Myonen umgewandelt hat. Dieses Phänomen gleicht der natürlichen Radioaktivität, also dem spontanen Zerfall/Umwandlung eines instabilen Atomkerns. Grob gesagt handelt es sich um zufällige Prozesse und gerade diese statistische Natur der Teilchenphysik bereitet Schüler\*innen Schwierigkeiten (vgl. Hopf, Schecker (2018), S. 229f.). Dabei gibt es mehrere Punkte, die betrachtet werden müssen.

Die erste Schülervorstellung umfasst ein Vermischen der Begrifflichkeiten der Möglichkeiten und der Wahrscheinlichkeiten. Eine typische Aussage eines\*r Lernenden wäre beispielsweise: „Der Kern kann in jeder Sekunde zerfallen oder nicht zerfallen. Also muss die Wahrscheinlichkeit  $\frac{1}{2}$  sein.“ (Hopf, Schecker (2018), S. 229) Hier werden die beiden Möglichkeiten „Kern zerfällt“ und „Kern zerfällt nicht“ als gleich wahrscheinlich aufgefasst, was zur fehlerhaften Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Kernzerfalls führt. In dieser fehlerbehafteten Analogie könnte die Aussage auf die Umwandlung von Myonen transferiert werden, folglich wäre die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Myon in einem Augenblick umwandelt, stets  $\frac{1}{2}$ . Das Beschreiben des Zufalls als natürlichen Charakter der Teilchen- und Astroteilchenphysik führt zu einem weiteren Problem. Schüler\*innen finden die statistische Beschreibung physikalischer Prozesse oft als unbefriedigend und in manchen Fällen leugnen sie den Zufall als Eigenschaft der Physik (vgl. Hopf, Schecker (2018), S. 230). Hierfür kann das folgende Zitat herangezogen werden: „In der Physik gibt es keinen Zufall, weil man alles mit physikalischen Gesetzen berechnen kann.“ (Hopf, Schecker (2018), S. 229) Man könne dieser Vorstellung nach also alles vorhersagen, wenn man nur genügend Informationen über den Ausgangszustand besäße, im Alltag wäre dies aber unmöglich, weil man eben nicht unendlich

viele Informationen sammeln könne (vgl. Hopf, Schecker (2018), S. 230). Den Widerspruch dieser deterministischen Ansicht, dass alle Zustände eines Systems vorherbestimmt sein, erbrachte allerdings die Quantenphysik.

Eine weitere Vorstellung, welche besonders durch den Umgang mit Cosmic@Web bedient werden kann, bezieht sich auf die Messunsicherheiten beim Durchführen physikalischer Experimente, in diesem Fall also die Messung / Detektion der kosmischen Strahlung. Oftmals sind Lernende der Meinung, dass es eindeutige und richtige Messergebnisse gibt, wenn die Messung nur genau genug ist und der\*die Messende alles korrekt macht (vgl. Hopf, Schecker (2018), S. 229 und vgl. Höttecke, Hopf (2018) S. 279f.). Das Auftreten von Messunsicherheiten wird also auf den aus Sicht der Lernenden eigenen fehlenden Professionsgrad zurückgeführt. Wenn die Daten nun also durch ein Online-Tool von einer professionellen Einrichtung (DESY) zur Verfügung gestellt würden, dann spiegeln diese Daten in der Lernendenvorstellung die hundertprozentige Wahrheit wider und Messunsicherheiten sind ausgeschlossen. Dies widerspricht dem Charakter einer Messung und bildet ein erhebliches Problem hinsichtlich des Evaluationsprozesses wissenschaftlicher Forschungen.

Beim Behandeln der kosmischen Strahlung kann eine weitere Schülervorstellung zum Vorschein kommen, die sich im allgemein auf die vermeintliche Gefährlichkeit von Strahlung aller Art bezieht. Lernende klassifizieren Strahlungsarten oft nach deren vermeintlicher Gefährlichkeit (vgl. Hopf, Schecker (2018), S. 234). So werden ionisierende Teilchenstrahlungen, wie die kosmische Strahlung, als gefährlich und gesundheitsschädlich wahrgenommen. Was jedoch dabei ausgeklammert wird, ist der Weg, den kosmische Teilchen in der Erdatmosphäre zurücklegen müssen. Die Strahlungsbelastung ist in Wirklichkeit nur bei dem Fliegen von Flugzeugen als relevantes Langzeitgesundheitsrisiko zu betrachten, weshalb Piloten\*innen Dosimeter mit sich führen müssen. Auf Bodenhöhe kommt es äußerst selten vor, dass Myonen oder Neutrinos Schädigungen in menschlichen Gewebeschnitten verursachen. Zum Beispiel wechselwirkt ein Neutrino im Schnitt nur alle 60 Jahre mit einem Atom oder Molekül des menschlichen Körpers.

Da sich Myonen mit ca. 98% der Vakuumlichtgeschwindigkeit bewegen, gelten in diesem Fall die Grundsätze der Relativitätstheorie. Lernende haben jedoch, basierend auf deren

Alltagserfahrungen, meist die Vorstellung, dass es einen absoluten Raum, absolute Längen und eine absolute Zeit gäbe (vgl. Hopf, Schecker (2018), S. 239). Folglich entstehen meist große Schwierigkeiten, wenn man im Unterricht zur Beschreibung der Relativbewegung zwischen Objekt und Beobachter und deren Bedeutung für den Raum, die Länge und die Zeit übergeht. Phänomene wie Längenkontraktion und Zeitdilatation wirken auf die Lernenden unlogisch und werden deshalb zunächst abgelehnt.

## **2.2 Didaktischer Hintergrund: Cosmic@Web**

Schüler und Schülerinnen den authentischen Arbeitsprozess als Astroteilchenphysiker\*in nachvollziehen und selbst forschen zu lassen, das ist das Ziel von Cosmic@Web, einem von DESY in Zeuthen entwickelten Online-Tool (vgl. Bradascio et al. (2019), S. 1). Cosmic@Web soll den didaktischen Rahmen der zu konzipierenden Unterrichtseinheit bilden. Darum wird in diesem Kapitel zunächst Cosmic@Web charakterisiert, das Konzept von Cosmic@Web und die damit einhergehende Arbeitsweise diskutiert, aber auch eventuelle Lernschwierigkeiten beim Umgang mit Diagrammen, welche einen Hauptbestandteil des Tools bilden, aufgezeigt.

### **2.2.1 Charakterisierung von Cosmic@Web**

Im Rahmen dieser Arbeit wird Cosmic@Web als Online-Tool bezeichnet oder wie in mehreren Papers als Online-Lernressource (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 1), Online-Lernangebot (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 28) oder Online-Lernplattform (vgl. Bradascio et al. (2019), S. 1) beschrieben. Dieses Kapitel soll dazu dienen, diese Begrifflichkeiten zusammenzuführen, zu charakterisieren sowie eventuelle Vor- und Nachteile zu skizzieren. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls auf das Potenzial des Einsatzes von Online Tools für den Physikunterricht und deren Rolle in der Digitalisierung eingegangen. Anhand der Menge der Begriffe, welche zur Beschreibung des didaktischen Charakters von Cosmic@Web genutzt werden und die alle in den Bereich der neuen Medien einzuordnen sind, kann man ableiten, dass diese Begriffe eher vage definiert sind und sich in vielen Punkten überschneiden. Anschaulich lässt sich der Charakter eines Online-Tools wiedergeben, indem der Begriff mit „Online-Werkzeug“ übersetzt wird. Der Inhalt des Namens schreibt dem Online-Medium also

schon eine Gebrauchswirkung zu, um Unterrichtsszenarien angemessen, interessant und lernförderlich zu gestalten. Der Nutzen steht im Vordergrund. ...

Ein weiterer Begriff, welcher zur Charakterisierung von Cosmic@Web herangezogen werden kann und der Cosmic@Web eine zusätzliche didaktische Dimension verleiht, ist der von Raimund Girwidz (2009) beschriebene Begriff des Cognitive Tools (vgl. Girwidz (2009), S. 424). Dabei wird die Internetseite von Cosmic@Web zum Hilfswerkzeug der geistigen Arbeit der Lernenden. Sie eignen sich für das Erledigen von Routinearbeiten (wie das händische Eintragen von Messpunkten), wodurch Kapazitäten für komplexere Betrachtungen des Sachverhalts freigegeben werden (vgl. Girwidz (2009), S. 424). Mögliche Merkmale von Cognitive Tools sind die grafische Benutzeroberfläche und die Variation von Variablen oder Modellparametern (vgl. Girwidz (2009), S. 424). Beide Merkmale sind in dem Diagrammerstellungsmodus von Cosmic@Web vorhanden. Dieser wird im folgenden Kapitel beschrieben.

Ein weiterer Aspekt, welcher mit der Nutzung von Online-Tools einhergeht, ist der schnellere Zugriff auf Informationen durch das Arbeiten am Computer / im Internet (vgl. Girwidz (2009), S. 423). Im Zuge des Arbeitens mit der größer werdenden Anzahl an digitalen Medien muss allerdings auch beachtet werden, dass die Nutzung dieser ebenfalls neue Arbeitstechniken voraussetzen, welche über das Bedienen einer Benutzeroberfläche bis zu Recherchefähigkeiten reichen (vgl. Girwidz (2009), S. 423). Die aktuelle Fachliteratur der didaktischen Forschung legt ihr Augenmerk dabei einerseits auf die Potenziale für einen gewinnbringenden Lernbeitrag dieser neuen Tools, andererseits werden damit einhergehende Probleme sowie Schwierigkeiten beschrieben (vgl. Girwidz (2009), S. 423).

Wenn man den Aufbau von Cosmic@Web betrachtet (siehe Kapitel 2.2.2) stellt man fest, dass das Informationspotenzial zu einem Hindernis werden kann. Die Informationen zu den Experimenten werden durch weiterführende Internetlinks immer wieder erweitert, sodass Schülern\*innen ein riesiges Angebot an fachlichem Wissen zur Verfügung gestellt wird. Jedoch ist es nicht immer einfach aus dieser schier riesigen Menge die gesuchten und richtigen Informationen zu gewinnen. Der zweite sich anschließende Punkt besteht in der Multimedialität auf die Schüler\*innen zurückgreifen können. Gemeint sind damit

verschiedene Quellen und Kanäle für Informationen (vgl. Girwidz (2009), S. 423), deren Anzahl in der heutigen Zeit ebenfalls rasant zunimmt. Diese Informationen werden folglich über verschiedene Darstellungsformen dargeboten, man muss jedoch beachten, dass Informationen ebenfalls von den Lernenden verarbeitet werden müssen.

### **2.2.2 Konzept von Cosmic@Web**

In den folgenden Absätzen wird das Konzept von Cosmic@Web beschrieben. Dies inkludiert die Voraussetzungen für das Arbeiten mit Cosmic@Web als auch den grundlegenden Aufbau und die Struktur des Online-Tools. Als erstes kann festgehalten werden, dass das Ziel von Cosmic@Web in dem Nachvollziehen eines wissenschaftlichen Forschungs- und Arbeitsablaufs durch die Schüler\*innen liegt. Von Lernenden formulierte oder aufgegriffene Forschungsfragen sollen untersucht werden. Dafür stellt Cosmic@Web Echtzeiten von verschiedenen Langzeitmessungen zur Verfügung, die ohne Programmiererfahrung von den Jugendlichen ausgewertet werden können (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 1).

#### **Voraussetzungen**

Die Voraussetzungen im Bereich des Sachwissens erstrecken sich von den Grundaussagen des Standardmodells der Elementarteilchen bis zu den physikalischen Größen zur Beschreibung des Verhaltens von Myonen. Kapitel 2.1 gibt einen Überblick über diese Voraussetzungen, welche ggf. didaktisch reduziert werden können. Cosmic@Web stellt jedoch ebenfalls eine Reihe von Internetseiten für das selbstständige Einarbeiten in den Themenkomplex zur Verfügung (vgl. DESY-Grundlagenwissen zu kosmischen Teilchen). Die technischen Voraussetzungen für das Arbeiten mit Cosmic@Web bestehen in dem Vorhandensein eines internetfähigen Endgeräts (Computer, Laptop, Tablet oder Smartphone), da über den auf dem Gerät installierten Webbrowser auf die Daten zugegriffen werden kann. Wichtig ist zu betonen, dass die Schüler\*innen für den Umgang mit Cosmic@Web über keinerlei Programmierkenntnisse verfügen müssen (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 1). Der Diagrammerstellungsmodus bietet eine grafische Oberfläche mit der die Darstellung der Messdaten in verschiedenen Diagrammen und Diagrammtypen möglich ist (vgl. Lindenau,



Schwerdt, Walter (2021), S. 1). Im erweiterten Modus zur Diagrammerstellung existieren weitere Möglichkeiten, auf die später eingegangen wird.

## **Aufbau von Cosmic@Web**

Grundlegend kann der Aufbau von Cosmic@Web in drei Unterpunkte gegliedert werden: einer Einführung in das Arbeiten mit Cosmic@Web, die Online-Datenbank zu den verschiedenen Experimenten und das Analyse-Tool / der Diagrammerstellungsmodus. Die Einführung in Cosmic@Web ist dabei in drei Einheiten untergliedert. Eine Informationsseite (vgl. DESY-Cosmic@Web) beschreibt dabei die grundlegende Struktur von Cosmic@Web und verweist des Weiteren auf die anderen beiden einführenden Einheiten: das Erklärvideo sowie das Tutorial zur Diagrammerstellung. Das Erklärvideo (vgl. DESY-Erklärvideo), welches von Wissenschaftlern\*innen aus Zeuthen erstellt wurde, thematisiert dabei den Ablauf eines Forschungsprozesses in der heutigen Wissenschaft nach dem Charakter der Nature of Science und die Rolle von Cosmic@Web in diesem Prozess. Auch die fachlichen Grundlagen der Astroteilchenphysik werden dabei grob umrissen. Es soll dazu dienen, Schüler\*innen zu motivieren sich tiefer mit den Funktionen von Cosmic@Web und den thematischen Inhalten der Astroteilchenphysik auseinanderzusetzen.

Für die Einführung in den Modus zur Diagrammerstellung existiert das bereits angesprochene Tutorial (vgl. Diagrammerstellungsmodus). In diesem wird ein Beispieldiagramm (Myonenrate-Zeit(xy)-Diagramm zum Polarstern-Experiment) unter Anleitung in achtzehn Schritten erstellt. Das Tutorial greift darüber hinaus auch die verschiedenen Diagrammtypen (xy-Diagramm, 1D- und 2D-Histogramm, Karte und Profil) auf, gibt kurze Erklärungen zu diesen und zu den physikalischen Größen, die miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Auch verweist es an den entsprechenden Stellen auf Seiten, die mehr Informationen zu dem angesprochenen Punkt bieten, wie beispielsweise zur physikalischen Größe „Zeit“ und deren Einheit. Es wird auf die Datenstruktur verwiesen, in der erklärt wird, in welcher Form und Einheit die Zeit als Diagrammvariable angegeben wird.

Auch die Struktur der Datensatzbeschreibungen wird erörtert, diese sind nach dem Schema „Zeitraum-Experiment-Anmerkungen“ aufgebaut. Die letzten Schritte des Tutorials

thematisieren die Notwendigkeit des Gebens eines Diagrammtitels, die verschiedenen Möglichkeiten zum Speichern eines erstellten Diagramms, beispielsweise durch das Herunterladen als png- oder pdf-Datei, aber auch über die Speicherung per Session-ID. Zuletzt gibt man dem\*r Lernenden die Möglichkeit bei Problemen, Schwierigkeiten oder Fehlern Kontakt per Mail aufzunehmen, auch wird auf eine detaillierte schriftliche Anleitung zur Erstellung von Diagrammen (vgl. DESY-Cosmic@Web-Dokumentation) verwiesen. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass sich das Tutorial lediglich auf den einfachen Modus zur Diagrammerstellung bezieht. Für den erweiterten Modus existiert kein solches Tutorial oder einführendes Material.

Die Online-Datenbank (vgl. DESY-Experimente) zu den neun verschiedenen Experimenten, welche mit Cosmic@Web untersucht und ausgewertet werden können, bildet den zweiten großen Bestandteil der Online-Lernressource. Wie der Name schon suggeriert, sind hier die wesentlichen Informationen zu den einzelnen Experimenten aufbereitet und übersichtlich dargestellt. Beim Aufrufen eines Experiments erhält man zunächst eine allgemeine Erklärung über den physikalischen Hintergrund sowie das Messprinzip. Weitere Punkte beinhalten eine Abbildung des Versuchsaufbaus sowie eine Materialliste, die Datenstruktur des jeweiligen Experiments, aber auch mögliche Beispiele für Aufgabenstellungen oder Diagramme, welche sich zum Untersuchen bestimmter Fragen eignen. Auch wird am Ende stets auf weitere Internetseiten verwiesen, welche zusätzliche Informationen zum Experiment bereithalten.

Der letzte große Bestandteil von Cosmic@Web ist der Modus zur Diagrammerstellung bzw. Datenauswertung (vgl. Diagrammerstellungsmodus). Die im Diagrammerstellungsmodus vorhandenen Datensätze wurden im Zuge von Langzeitmessungen, welche meist acht Jahre dauerten, gesammelt (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 2). Die meisten der dafür genutzten Detektoren befanden sich dabei in Zeuthen, jedoch gibt es auch andere Beispiele wie die Detektoren auf dem Forschungsschiff Polarstern oder auf der Zugspitze. Weiterhin ist es wichtig zu betonen, dass keine Reduktion der Daten erfolgte, da dies wesentliche Arbeitsschritte sind, welche von den Schülern\*innen vorgenommen werden können, allerdings nur im erweiterten Modus (vgl. Schwerdt et al. (2020) S. 31). Auch die Analyse sowie die Interpretation der Diagramme erfolgt nicht durch das Online-Tool, die Lernenden müssen dazu angehalten werden, dies eigenständig durchzuführen.

Im Diagrammerstellungsmodus kann man auf einer grafischen webbasierten Benutzeroberfläche zwischen dem einfachen und dem erweiterten Modus sowie zwischen deutschen und englischsprachigen Webseiten wählen. Der Unterschied der Modi liegt in den Möglichkeiten zum Erstellen von Korrektur- und Fitfunktionen sowie zur Datenanpassung, was nur in dem erweiterten Modus möglich ist. Wie bereits erwähnt, gestaltet sich das Erstellen eines Diagramms über die verschiedenen Diagrammerstellungstools, was das Auswählen des Experiments und des gewünschten Datensatzes, das Festlegen des Diagrammtyps und die Wahl der Variablen beinhaltet. Die Möglichkeit zum Belegen der physikalischen Größen wird automatisch an die Dimension des Diagrammtyps angepasst. Auch ist es möglich mehrere Datenreihen zu erstellen, um Datensätze unterschiedlicher Zeiträume oder Experimente miteinander zu vergleichen. Nach dem Festlegen der Diagrammparameter wird das Diagramm automatisch erstellt und kann wie bereits beschrieben gespeichert werden.

### **CosMO-Mühle und LiDO-Experiment**

Experimente, die durch bestehende Fachliteratur bereits analysiert und mit Cosmic@Web erprobt wurden, sind dabei die CosMO-Mühle zum Analysieren des Zusammenhangs zwischen dem Einfallswinkel und der Myonenrate (und ggf. der Temperatur) sowie das LiDO-Experiment zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 32). Beide Experimente wurden im Rahmen einer Projektwoche zur Untersuchung kosmischer Teilchen mit Erfolg durchgeführt (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 29ff.), weshalb sich diese beiden Versuche für eine Implementation in die Unterrichtseinheit eignen.

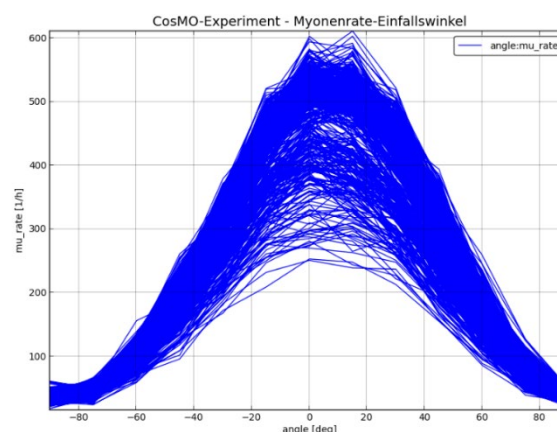


Abbildung 4: CosMO-Mühle – Myonenrate(Einfallswinkel)-Diagramm.

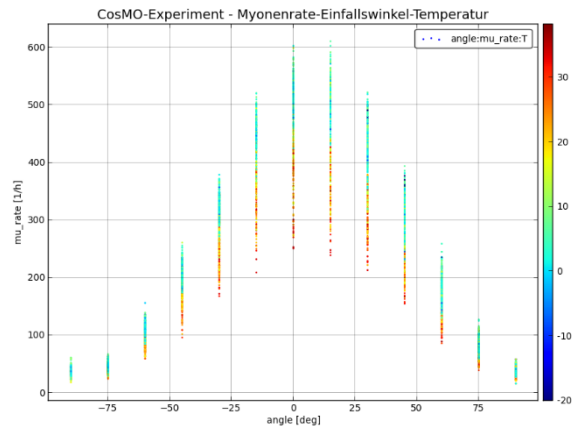


Abbildung 5: CosMO-Mühle – Myonenrate(Einfallswinkel, Temperatur)-Diagramm.

Der Zusammenhang zwischen Myonenrate und Einfallswinkel wird dabei in einem xy-Diagramm veranschaulicht. Definiert man die Temperatur als zusätzliche z-Variable, so erweitert sich das Diagramm um eine Dimension, die Messpunkte werden durch eine vorher festgelegte Farblegende ergänzt. Bei Analyse der Messdaten stellt man fest, dass die Myonenrate ein Maximum bei  $\alpha = 0^\circ$  besitzt. Dies liegt an der Abhängigkeit der Länge der Wegstrecke, welche das Myon in der Erdatmosphäre zurücklegt, von dem Einfallswinkel.

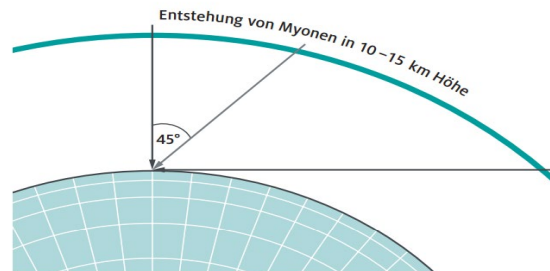


Abbildung 6: Länge der Flugstrecken von Myonen in Abhängigkeit des Einfallswinkels.

Für den Fall des senkrechten Einfalls ist die vom Myon zurückgelegte Strecke die kürzeste, es werden also nur wenige Myonen bei ihrem Weg durch die Atmosphäre von Luftmolekülen absorbiert oder gestreut. Bei flacherem Einfall ist die Wegstrecke entsprechend länger und die Anzahl der absorbierten / gestreuten Myonen steigt, weshalb die Myonenrate sinkt. Weiterhin ergibt sich, dass mit zunehmender Temperatur die Myonenrate sinkt. Dies kann über Definition der Temperatur als mittlere kinetische Energie der Teilchen begründet werden. Mit steigender Temperatur bewegen sich die Luftmoleküle schneller, es kommt also zu mehr Zusammenstößen mit Myonen, woraufhin Myonen absorbiert oder auch gestreut werden oder zerfallen.

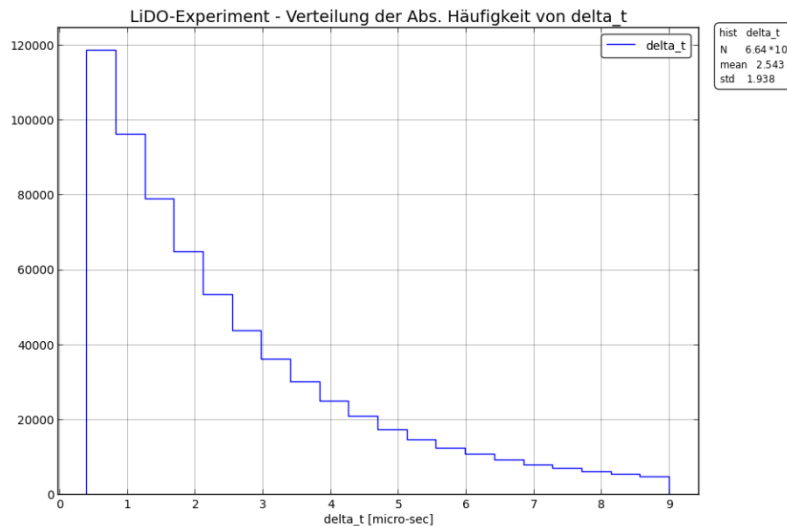


Abbildung 7: LiDO-Experiment – Zeitdifferenz-Histogramm.

Die Bestimmung der mittleren Lebensdauer erfolgt hingegen über ein 1D-Histogramm, welches die Häufigkeiten der Zeitdifferenzen  $\Delta t$  zweier Lichtblitze in einem Flüssigszintillator wiedergibt. Die Verteilung ähnelt einem exponentiellen Zerfall. Über die im vorherigen Kapitel 2.1.2 beschriebene Formel kann eine Fit-Funktion gebildet und anhand der Funktionsgleichung bzw. der Zerfallskonstante die mittlere Lebensdauer berechnet werden. Diese besitzt den theoretischen Wert:  $\tau = 2,2\mu\text{s}$

Interessant ist an dieser Stelle, dass obwohl beide Experimente empirisch mit Schüler\*innen erprobt wurden, sich die Auswertungsmethoden stark unterscheiden.

### Kompetenzen beim Umgang mit Cosmic@Web

Im Zuge der Kompetenzorientierung des heutigen Physikunterrichts stellt sich die Frage inwiefern das Arbeiten mit Cosmic@Web durch die Bildungsstandards definierte Kompetenzen fördert und voraussetzt. Die bisherigen Einsätze von Cosmic@Web und der Blick in die entsprechende Fachliteratur geben Aufschluss über diesen Sachverhalt. Konkret wird dafür die bereits erwähnte und von Schwerdt et al. (2020) beschriebene Projektwoche herangezogen. Die Autoren des Artikels schreiben dem Arbeiten mit Cosmic@Web die Förderung von Kompetenzen im Bereich des Erkenntnisgewinns und der Kommunikation zu.

Bei Betrachtung der durch die Kultusministerkonferenz zur allgemeinen Hochschulreife definierten Kompetenzen ergeben sich die folgenden Schwerpunkte beim Arbeiten mit Cosmic@Web.

Kompetenzbereich	Kompetenz	Die Lernenden...
Erkenntnisgewinn	E1	„identifizieren und entwickeln Fragestellungen zu physikalischen Sachverhalten“ (KMK (2020), S. 15)
	E4	„modellieren Phänomene physikalisch, auch mithilfe mathematischer Darstellungen und digitaler Werkzeuge, wobei sie theoretische Überlegungen und experimentelle Erkenntnisse aufeinander beziehen“ (KMK (2020), S. 15)
	E6	„erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen oder recherchierten Daten gefundenen Strukturen und Beziehungen“ (KMK (2020), S. 15)
Kommunikation	K1	„recherchieren zu physikalischen Sachverhalten zielgerichtet in analogen und digitalen Medien und wählen für ihre Zwecke passende Quellen aus“ (KMK (2020), S. 16)
	K3	„entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder“ (KMK (2020), S. 17)
	K5	„wählen ziel-, sach- und adressatengerecht geeignete Schwerpunkte für die Inhalte von Präsentationen, Diskussionen oder anderen Kommunikationsformen aus“ (KMK (2020), S. 17)
	K6	„veranschaulichen Informationen und Daten in ziel-, sach- und adressatengerechten Darstellungsformen, auch mithilfe digitaler Werkzeuge“ (KMK (2020), S. 17)
	K7	„präsentieren physikalische Sachverhalte sowie Lern- und Arbeitsergebnisse sach-, adressaten- und situationsgerecht unter Einsatz geeigneter analoger und digitaler Medien“ (KMK (2020), S. 17)

*Tabelle 1: Mit Cosmic@Web verbundene Kompetenzen.*

Die Kompetenzen im Bereich des Erkenntnisgewinns werden durch den Arbeitsprozess mit Cosmic@Web, welcher dem wissenschaftlichen Arbeitsprozess im Sinne der Nature of Science ähnelt, gefördert. Das Formulieren von Forschungsfragen (E1), das Recherchieren von Daten

und Hintergrundwissen sowie das Anwenden und Beurteilen physikalischer Modelle (E4) sind wesentliche Schritte dieses Prozesses. Die Kompetenz E6 wird dabei besonders durch den Arbeitsschritt des Interpretierens der erstellten Diagramme erfüllt. Folglich müssen die Grundlagen für einen fachlich korrekten Interpretationsprozess im Vorfeld gelegt werden.

Die in Tabelle 1 zitierten Kommunikationskompetenzen werden ebenfalls beim Arbeiten mit Cosmic@Web gefördert, zum Beispiel bei dem Recherchieren zu den Hintergründen des Experiments (K1) oder bei gruppeninternen Absprachen oder Diskussionen. Jedoch kann man eine zusätzliche Dimension hinzufügen, indem man einen wissenschaftlichen Rahmen für das Arbeiten mit dem Online Tool schafft, welcher sich konkret in der Präsentation der Ergebnisse am Ende der Arbeitsphase äußert. Dadurch werden insbesondere die Kompetenzen K3, K5, K6 und K7 gefördert. Dies bedeutet, dass eine Gruppe von Lernenden die wesentlichen Aspekte der von ihnen untersuchten Fragestellung bzw. des untersuchten Experiments wiedergeben, Methoden für die Auswertung der Experimentierdaten aufzeigen sowie die Messdaten mit ihrem physikalischen Hintergrundwissen erörtern. In einer anschließenden Diskussions- oder Fragerunde können kommunikative, aber auch sozialkommunikative Kompetenzen weiter gefördert werden. Nach Einschätzung des Autors kann man anfügen, dass Cosmic@Web ebenfalls Kompetenzen im Bereich des Sachwissens fördert. Dazu zählen die folgenden Kompetenzen.

Kompetenzbereich	Kompetenz	Die Lernenden...
Sachkompetenz	S1	„erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien“ (KMK (2020), S. 14)
	S2	„erläutern Gültigkeitsbereiche von Modellen und Theorien und beschreiben deren Aussage- und Vorhersagemöglichkeiten“ (KMK (2020), S. 14)
	S5	„erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus“ (KMK (2020), S. 14)
	S6	„erklären bekannte Auswerteverfahren und wenden sie auf Messergebnisse an“ (KMK (2020), S. 14)

*Tabelle 2: Mit Cosmic@Web verbundene Sachkompetenzen.*

Gründe für diese Ansicht sind einerseits der wissenschaftliche Charakter der Interpretation solcher Diagramme, insbesondere die Erklärung der Messdaten über das Nutzen geeigneter physikalischer Modelle (S1), und andererseits die Anwendung mathematischer Verfahren auf physikalische Sachverhalte, in diesem Fall das Erstellen einer Fit-Funktion (S6). Um die jeweiligen Experimente jedoch fachlich korrekt auswerten zu können, müssen die Lernenden jedoch im Vorfeld den Versuchsaufbau sowie den Ablauf des Prozesses analysieren (S5). Die Sachkompetenz S2 wird vor allem bei dem LiDO-Experiment zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer vorausgesetzt. Bei einer Geschwindigkeit der Myonen, die 99% der Vakuumlichtgeschwindigkeit entspricht, ergibt sich mit Hilfe der Bewegungsgleichung für gleichförmige Bewegungen eine durchschnittliche Flugstrecke von ca. 700 Metern. Da Myonen allerdings in einer Höhe von ca. 10 Kilometern entstehen, ist es offensichtlich, dass die klassische Berechnung in diesem Fall nicht anwendbar ist. Stattdessen kann der Lorentzfaktor berechnet und mit diesem ein Maß für die Zeitdilatation gefunden werden. Die Gültigkeitsbereiche der klassischen Physik bzw. der klassischen Mechanik und der speziellen Relativitätstheorie können also über dieses Experiment diskutiert werden, wodurch die Kompetenz S2 gefördert wird.

### **2.2.3 Arbeiten mit Diagrammen im Physikunterricht**

Um das Arbeiten mit Diagrammen im Physikunterricht zu beschreiben, erfolgt an dieser Stelle zunächst eine Charakterisierung des Begriffs des Diagramms. Diagramme sind depiktionale Repräsentationen, das bedeutet, dass zwischen dem Objekt (dem physikalischen Sachverhalt) und seiner Darstellung (also dem Diagramm) eine Ähnlichkeit besteht (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 146f.). Im Gegensatz zu Fotoaufnahmen ist diese Ähnlichkeit jedoch nicht augenscheinlich, der dargestellte Sachverhalt wird bei Diagrammen durch Konvention festgelegt, d.h. „die (logischen) Relationen zwischen den Merkmalen sind innerhalb des Diagramms und innerhalb des abgebildeten Sachverhalts gleich“ (Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 146f.). Konkret beschrieben, stellen Diagramme den Zusammenhang zwischen verschiedenen Variablen (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147), im Kontext der Physik meistens physikalische Größen, dar.



Man unterscheidet dabei in die Darstellung qualitativer Relationen, zum Beispiel über Pfeil-, Fluss oder Baumdiagramme, in denen einzelne Einheiten miteinander über Pfeile / Linien verknüpft werden (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147). Diese Diagrammtypen werden bezüglich ihres Inhalts interpretiert (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147). Auf der anderen Seite existieren Achsendiagramme, welche im Physikunterricht eine wesentlich größere Rolle einnehmen und die sich durch das Vorhandensein mindestens einer kontinuierlichen Variablen auszeichnen (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147). Die Ausprägungen, welche eine Variable / physikalische Größe annehmen kann, werden dabei auf den Diagrammachsen abgetragen wodurch ein Element des Diagramms, also ein Datenpunkt o.ä., durch seine Lage zu den Diagrammachsen charakterisiert werden kann (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147). Zu Achsendiagrammen zählen beispielsweise Linien-, Säulen- oder Streudiagramme sowie alle Diagrammtypen, welche quantitative Zusammenhänge der verschiedenen Variablen beschreiben (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147).

## **Arbeitsprozesse**

In der Fachliteratur wird dem Arbeiten mit Diagrammen eine lernförderliche Wirkung zugeschrieben, insbesondere wenn dieser Arbeitsprozess das selbstständige Konstruieren miteinschließt (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 145). Besonders Kompetenzen im Bereich der Kommunikation werden durch das Arbeiten mit Diagramm und dem damit einhergehenden Erlernen der passenden Verhaltensweisen gefördert. Lachmayer, Nerdel und Prechtel (2007) beschreiben jedoch, dass für das Erzielen dieser lernförderlichen Wirkung mehrere Dinge beachtet und mit verschiedenen Lernschwierigkeiten (siehe Kapitel 2.2.6) gerechnet werden müssen (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 145).

Grundsätzlich existieren zum Arbeiten mit Diagrammen zwei verschiedene theoretische Ansätze, welche sich nach den gegebenen Voraussetzungen und dem gewünschten Zielzustand richten. Der erste Ansatz, die Informationsentnahme, beschreibt die Nutzung eines dargebotenen Diagramms durch die Schüler\*innen und verfolgt dabei das Ziel des inhaltlichen Erschließens des dargestellten Sachverhalts (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147). Die zweite Arbeitsweise, die Konstruktion, bezeichnet das Nutzen vorhandener oder eigenständig durch die Lernenden erhobener Daten zur Visualisierung des

Zusammenhangs dieser Daten in einem Diagramm (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147). Im Folgenden werden die wesentlichen Arbeitsschritte für jeden der zwei Ansätze beschrieben. Dies legt die Grundlage für die Einordnung von Cosmic@Web in den Arbeitsprozess mit Diagrammen (siehe Kapitel 2.2.4).

Der erste Ansatz, welcher als Informationsentnahme bezeichnet werden kann, weist eine Untergliederung in mehrere Arbeitsschritte auf. Der erste Schritt zum Verstehen des Diagramms besteht dabei in der Identifizierung/in einer Analyse des Rahmens (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147). Das Ziel besteht für die Lernenden darin, sich einen Überblick über das Diagramm, welches die zu analysierenden Informationen enthält, zu verschaffen, um bereits ohne genaue Betrachtung der gegebenen Daten Aussagen über den Inhalt des Diagramms formulieren zu können (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147f.). Dies beinhaltet das Vergegenwärtigen der im Diagramm existierenden Variablen, dem Zuordnen der Variablen zu graphischen Strukturen, sowie der Identifizierung der unabhängigen und der abhängigen Variable anhand der Zuordnung zu den verschiedenen Diagrammachsen (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 147). Auch wird die eventuell vorhandene Diagrammlegende sowie die Skalierung der Diagrammachsen analysiert (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 148). Zum Beispiel könnte eine solche Aussage lauten: In diesem s(t)-Diagramm ist die Abhängigkeit der zurückgelegten Strecke von der Zeit dargestellt. Das Zeitintervall, in dem gemessen wurde, beträgt fünf Minuten. Die Wichtigkeit der Phase der Identifizierung wird durch die Studie von Maichle (1994) betont, mit der festgestellt werden konnte, dass Lernende, welche die Identifizierungsphase übersprangen, wesentlich länger für das Beantworten von diagrammbezogenen Fragen brauchten als die Schüler\*innen, welche zuvor den Rahmen des Diagramms analysierten (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 148).

Nach dem Durchführen der Identifizierung, welche als Voraussetzung für die nun folgende Phase gilt, folgt das Ablesen. Dies beinhaltet das Treffen von Aussagen anhand der Betrachtung der dargestellten Datenpunkte sowie deren Beziehung zu den Diagrammachsen und den Variablen (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 149). Das Ablesen kann in drei Dimensionen/Stufen gegliedert werden. Die elementare Stufe bezieht sich dabei auf das Ablesen eines Variablenwerts eines Datenpunkts (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S.

149). Die mittlere Stufe beinhaltet Aussagen, welche sich auf eine Gruppe von Diagrammelementen beziehen und Aussagen, die sich auf alle Elemente einer in dem Diagramm dargestellten Variable beziehen, werden der oberen Stufe zugeordnet (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 149). Mit jeder zunehmenden Ablesestufe gestaltet sich die Entnahme von Informationen schwieriger und setzt komplexere Gedankenprozesse voraus (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 149). In diesem Zusammenhang können ebenfalls erkennbare Trends der Datenpunkte, Auffälligkeiten oder Gruppierungen gefunden werden. Es muss jedoch angemerkt werden, dass sich das Ablesen und die damit einhergehenden Strategien zur Diagramminterpretation nach dem vorhandenen Kontext richten (vgl. Ivanjek et al. (2016), S. 1)

Der zweite Ansatz zum Arbeiten mit Diagrammen kann unter dem Begriff der Konstruktion beschrieben werden. Es wird im Folgenden auf wesentliche Kernpunkte eingegangen, die von Lachmayer, Nerdel und Prechtel (2007) in einer tabellenartigen Übersicht skizziert wurden. Der erste von zwei Schritten beinhaltet das Festlegen des Aufbaus des Rahmens (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 156). Am Anfang steht dabei die Wahl des Diagrammtyps (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 156). Dies kann entweder durch einen vorgegebenen Rahmen erfolgen, indem zum Beispiel bekannt ist, ob eine Variable von der anderen abhängig ist, oder völlig frei, wenn die Lernenden nur aufgrund des vorgegebenen Datensatzes einen Diagrammtyp wählen müssen. Die Variablen werden daraufhin den einzelnen Diagrammachsen zugeordnet (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 156). Anschließend folgen das Zeichnen des Achsenkreuzes, die Beschriftung der Achsen sowie die Wahl der passenden Skalierung der Achsen zur adäquaten Beschreibung des Sachverhalts (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 156). Gegebenenfalls kann in diesem ersten Schritt eine Legende zum besseren Verständnis des Diagramms erstellt werden.

Der zweite Schritt besteht in dem Eintragen der Daten (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 156). Dabei werden zunächst die Datenpunkte eingetragen, was dem Ablesen auf der elementaren Stufe entspricht (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S: 153 und S. 156). Die Lernenden müssen den jeweiligen Datenwerten die passende Variable zuordnen, um so die relative Position des Messpunktes zu den Achsen passend zu wählen (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 153). Im Anschluss folgt die nächste Konstruktionsleistung, welche auch als

Skizzierung (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 153) bezeichnet werden kann. Im Rahmen dieser Phase werden Kurvenverläufe gezeichnet, dies kann entweder in Form einer Verbindungslinie zwischen zwei bereits eingetragenen Datenpunkten geschehen, oder aber in Form einer Trendlinie, analog zum Ablesen mittlerer Stufe bei der Informationsentnahme, da eine Reihe von Messpunkten betrachtet und analysiert werden muss, um den Trend herauszuarbeiten (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 153). Bei komplexeren Vorgängen, zum Beispiel zeitlich periodischen Prozessen, kann gegebenenfalls auf das Zeichnen mehrerer Trendlinien zurückgegriffen werden, dem Analogon zum Ablesen der höchsten Stufe (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 153). Dabei erfolgt die Betrachtung des gesamten Messintervalls der Variablen. Diese Trends können anschließend miteinander verglichen werden.

#### **2.2.4 Arbeiten mit Diagrammen in Cosmic@Web**

Das Arbeiten mit Diagrammen stellt einen wichtigen Aspekt beim Umgang mit Cosmic@Web dar, da Diagramme im Rahmen des Online Tools als wichtigstes Werkzeug zum Untersuchen der wissenschaftlichen Fragestellungen angeboten werden. Nachdem in Abschnitt 2.2.2 die beiden bereits mit Lernenden analysierten und ausgewerteten Experimente vorgestellt und in Kapitel 2.2.3 generelle Vorgehensweisen beim Umgang mit Diagrammen skizziert wurden, soll an dieser Stelle ein Überblick über die generelle Vorgehensweise beim Arbeiten mit Cosmic@Web gegeben werden. Auch sollen die Funktionen von Cosmic@Web in das im Kapitel 2.2.3 vorgestellte Modell eingeordnet werden.

Wie bereits beschrieben, besteht der Diagrammerstellungsmodus von Cosmic@Web aus mehreren Komponenten. Diese werden hier der Vollständigkeit halber noch einmal aufgezählt und kurz erklärt. Der Anfang besteht in der Auswahl eines Experiments und der Wahl eines Datensatzes. Im Anschluss daran wird der passende Diagrammtyp eingestellt, der\*die Nutzer\*in hat an dieser Stelle mehrere Auswahlmöglichkeiten, welche im Kapitel 2.2.2 aufgezählt wurden. Durch die Auswahl eines Diagrammtyps wird das Layout abgeändert, sodass der\*die Lernende die nun passende Variable auswählen kann. Auch hier wird wieder aus einer Liste möglicher Variablen ausgewählt. Am Schluss erhält das Diagramm einen Titel,

der beliebig formuliert werden kann. Im erweiterten Modus zur Diagrammerstellung werden zwei zusätzliche Funktionen zum Erstellen von Korrektur- und Fitfunktionen hinzugefügt.

Nachdem die Komponenten nun genannt wurden, stellt sich nun die Frage, welche Aspekte des Arbeitens mit Diagrammen durch den Umgang mit Cosmic@Web bedient werden. Das Arbeiten mit Cosmic@Web lässt sich keinem der beiden theoretischen Ansätze vollständig und eindeutig zuordnen, vielmehr integriert es verschiedene Punkte und entwickelt diese im Sinne eines naturwissenschaftlichen Forschungsprozesses weiter. Beispielsweise lassen sich wesentliche Schritte beim Erstellen von Diagrammen in Cosmic@Web zum Ansatz der Konstruktion zuordnen. Dazu zählen beispielsweise die von Lachmayer, Nerdel und Prechtel (2007) beschriebenen Begrifflichkeiten der Wahl des passenden Diagrammtyps oder die Zuordnung der Variablen zu den Achsen, sprich die Festlegung des Diagrammrahmens.

Cosmic@Web beinhaltet jedoch auch mehrere Elemente der Informationsentnahme, die von Lachmayer, Nerdel und Prechtel (2007) beschrieben wurde. Dies liegt vor allem daran, dass die erstellten Diagramme stets interpretiert und mit dem physikalischen Hintergrundwissen der Lernenden erklärt werden sollen. Demzufolge können beim Arbeiten mit Cosmic@Web alle drei Stufen des Ablesens von Datenpunkten bedient werden, vom Ablesen einzelner Datenpunkte, wie zum Beispiel des Maximums der Myonenrate im CosMO-Experiment oder das Ablesen der höchsten Stufe, indem die Verteilung der Messdaten im 1D-Histogramm des LiDO-Experiments einem exponentiellen Zerfall zugeordnet wird. Durch die Vielfältigkeit der verschiedenen Aspekte, die beim Umgang mit dem Online Tool benötigt und geschult werden, ist es nötig die Einsatzmöglichkeiten und die damit verbundenen Potenziale für einen gewinnbringenden Einsatz abzuschätzen.

### **2.2.5 Anwendungsmöglichkeiten im Unterricht**

An dieser Stelle soll die bisher veröffentlichte Fachliteratur zu Cosmic@Web herangezogen und auf deren Grundlage die bisherigen Einsätze von Cosmic@Web beschrieben werden. Nach Abschluss des Beschreibens des Forschungsstands wird das Potenzial des Einsatzes von Cosmic@Web im Physikunterricht abgeschätzt.

## **Forschungsstand / Bisheriger Einsatz von Cosmic@Web**

Die Einsicht in die Fachliteratur, welche mehrere von Wissenschaftler\*innen erstellte Schriften zum Umgang mit Cosmic@Web und Darstellungen der bisherigen Einsätze von Cosmic@Web im schulischen Kontext beinhaltet, lässt die folgenden Schlüsse zu. Bisher wurde Cosmic@Web vor allem von Schüler\*innen, die ein Gymnasium besuchen, genutzt (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 1). Dies geschah allerdings nicht durch eine Implementierung in den Physikunterricht über das Anknüpfen an bestehende fachliche Inhalte. Cosmic@Web wurde im Rahmen von Projekt- oder Forschungswochen (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 29) sowie in wissenschaftlichen Praktika oder digitalen Workshops (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 4f.) an die Lernenden herangeführt.

Dies geschah dabei nicht in dem räumlichen Umfeld des Klassenzimmers, sondern meist in einer Forschungsinstitution. Auch weisen die bisherigen Einsätze von Cosmic@Web eine ähnliche Struktur bezüglich des zeitlichen Ablaufs auf. Die Praktika bzw. Projektwochen starten mit einem Einführungsvortrag zur Astroteilchenphysik und zur kosmischen Strahlung, der von Mitarbeitenden der Forschungseinrichtung gehalten wird (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 29). Im Anschluss daran erarbeiten die Lernenden im Rahmen der von Schwerdt et al. (2020) beschriebenen Projektwoche in Gruppenarbeit mit Hilfe von Cosmic@Web eigene Forschungsfragen und versuchen diese über die erstellten Diagramme zu analysieren und zu beantworten. Lehrpersonen und ggf. Wissenschaftler\*innen geben dabei Hinweise zum Formulieren von Fragestellungen und Hypothesen, wissen unter anderem auf mögliche Fehler hin und stehen den Lernenden allgemein für Fragen zur Verfügung. Dabei gibt es kleine Unterschiede. In dem von Lindenau, Schwerdt und Walter (2021) beschriebenen Online-Workshop wurden ausschließlich Cosmic@Web und die Diagrammerstellungsfunktion genutzt. In anderen Projekten, wie zum Beispiel in der von Schwerdt et al. (2020) skizzierten Projektwoche, nutzte man einen zusätzlichen Versuchsaufbau mit CosMO-Platten, führte darüber Messungen durch und konnte diese anschließend mit den in Cosmic@Web gespeicherten Datensätzen vergleichen.

Nach Ende der Gruppenarbeit und der Analyse der Daten wird meist das von den Schülern\*innen erstellte Lernprodukt präsentiert. Dies geschah in Form einer Präsentation der

Untersuchungsergebnisse via Power Point oder im Fall der Projektwoche durch das Vorstellen eines Lernposters (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 29). Mit dieser Grundlage erklärten die Jugendlichen ihre Arbeitsweise, die Forschungsfrage und die gefundenen Ergebnisse und regten anschließend zu einer Diskussion an. In dieser konnten offene Fragen der Zuhörer\*innen geklärt und fachliches Feedback der Wissenschaftler\*innen eingeholt werden.

Die bisherigen Forschungen zum Einsatz von Cosmic@Web liefern ebenfalls Erfahrungsberichte durch Schülerinnen und Schüler, welche mit dem Online Tool arbeiteten, als auch von Lehrkräften, die die Projektwochen betreuten. Dabei gaben der überwiegende Teil der Jugendlichen an, dass das Arbeiten mit Cosmic@Web, d.h. die Datenanalyse, für sie interessant war und Spaß gemacht hat (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021) S. 6f.). Eine andere Erkenntnis, welche man aus den Befragungen ziehen konnte, war, dass sich das Bild von der Arbeit als Physiker\*in durch den Einsatz von Cosmic@Web nicht sonderlich gewandelt hat, da die meisten Lernenden diese Frage mit „partly true and partly not“ beantworteten (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 6f.). Auch ist deutlich, dass sich die Lernenden selbst bis zu einem gewissen Grad in der Rolle von Forschern\*innen sahen (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 6f.). Die Zustimmung zu dieser Aussage ist jedoch nicht mehr so hoch, wie noch bei der Angabe des Interesses bei der Datenanalyse mit Cosmic@Web (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 6f.). Bei der Frage nach weiterer Beschäftigung mit Cosmic@Web gaben zudem mehr als 50% der Schüler\*innen an, dass sie sich dies durchaus vorstellen könnten (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 6f.).

Befragungen der Lehrkräfte ergaben die folgenden Einschätzungen. Lehrer\*innen wurden zur Eignung von Cosmic@Web im Schulunterricht gefragt, ob sie das Tool selbst verwenden würden und ob man die Möglichkeit des Einsatzes in dem eigenen Unterricht für wahrscheinlich hält (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 6). Die Antworten der Lehrkräfte auf diese drei Fragen zeigen, dass diese den Einsatz für Cosmic@Web im Schulunterricht durchaus für möglich halten (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 6f.). Über 80% würden Cosmic@Web gerne für den eigenen Unterricht nutzen und 60% der befragten Lehrkräfte sehen eine Möglichkeit zum Einsatz des Online Tools im eigenen Unterricht (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 6f.). Im Umkehrschluss folgt aus diesen Antworten, dass ein Fünftel der Lehrpersonen Cosmic@Web zwar gerne verwenden würden,

jedoch keine Einsatzmöglichkeit sehen. Daraus kann man schließen, dass das Implementieren von Cosmic@Web in den Schulunterricht erwünscht ist, aber auch mit bestimmten Voraussetzungen verbunden ist, welche in den folgenden Absätzen beschrieben werden.

### **Abschätzung des Potenzials für einen gewinnbringenden Einsatz im Physikunterricht**

Worin liegt nun der Hauptunterschied bei Betrachtung des bisherigen Einsatzes von Cosmic@Web in Projektwochen im Vergleich zum Schulunterricht. Dieser liegt eindeutig in der Menge der zur Verfügung stehenden Zeit. Im Rahmen einer Projektwoche arbeiten die Lernenden zwischen zwei und vier Tagen mit Cosmic@Web, was einem geschätzten Stundenumfang von mindestens acht Zeitstunden entspricht. Die Zeit, welche die Lernenden in einer Unterrichtseinheit nutzen können, ist dabei sehr viel knapper bemessen. Wie bereits beschrieben soll die Unterrichtseinheit in der zehnten Klasse an den dritten Lernbereich anknüpfen und sechs Unterrichtsstunden umfassen. (Die Begründung für diese Entscheidung wird in Kapitel 3.1 erörtert.) Folglich muss die Struktur der bisherigen Einsätze für den Unterricht abgewandelt und modifiziert werden. Dies kann an mehreren Punkten geschehen.

Ein Punkt, welcher den Lernenden Probleme bereitete, war das nur geringfügig vorhandene Vorwissen im Themenfeld der Astroteilchenphysik (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 29). Für das Unterrichtskonzept folgt daraus, dass man analog zu den bisherigen Forschungen zu Beginn eine Einführung in die Astroteilchenphysik mit den Lernenden erarbeiten muss. Auf dieser fachlichen Grundlage kann im weiteren Verlauf aufgebaut werden. Des Weiteren gaben Lernende an, dass sie Probleme beim Gestalten des wissenschaftlichen Lernposters hatten, da ihnen diese Form der Präsentation fremd war (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 29). Im Rahmen der Projektwoche konnte auf erstellte Lernposter zurückgegriffen werden, diese wurden den Schüler\*innen als Beispiel präsentiert, an dem sie sich orientieren konnten (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 29). Die Schüler\*innen gaben an, dass sie sich mit zunehmender Zeit besser in das Erstellen vertiefen konnten, diese Zeit steht allerdings im Schulunterricht nicht zur Verfügung. In der Unterrichtseinheit könnte dieses Problem gelöst werden, indem man den Lernenden zu Beginn des Arbeits- bzw. Forschungsprozesses Kriterien nennt, auf die sie sich bei der am Ende stattfindenden Präsentation stützen können. Die grundlegende Struktur der Unterrichtseinheit ähnelt also den bisherigen Implementationen und besteht aus einer



Einführungs-, Arbeits- und Präsentationsphase. Besonders die Bedeutung der Einführungsphase in die Astroteilchenphysik wurde in den Erfahrungen zur Projektwoche betont (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 29). Die an die Lernenden gegebenen Aufgaben und Arbeitsaufträge müssen jedoch abgewandelt werden.

Zusammenfassend kann man folgendes festhalten. Cosmic@Web birgt Potenzial für einen gewinnbringenden Einsatz im Physikunterricht. Dafür gibt es im Wesentlichen drei Gründe. Der erste Grund ist die Menge an Kompetenzen, die durch das Arbeiten mit Cosmic@Web gefördert werden. Im Sinne eines kompetenzorientierten und modernen Physikunterrichts ist die Einbindung von Cosmic@Web also durchaus sinnvoll. Der zweite Grund besteht in dem motivierenden Charakter der Astroteilchenphysik als spannendes Thema für die Schüler\*innen, was durch die Befragungen der Lernenden gezeigt wurde (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 6f.). Und der dritte Grund liegt darin, dass Lernende über Cosmic@Web einen authentischen wissenschaftlichen Arbeitsprozess nachvollziehen können. Diese Aussage wird durch die von Lindenau, Schwerdt und Walter (2021) beschriebenen Befragungen der Lernenden gestützt.

Jedoch müssen für das Erstellen des Unterrichtskonzeptes mehrere Faktoren, wie die zur Verfügung stehende Zeit oder das limitierte Vorwissen der Lernenden beachtet werden. Es ergibt sich also, dass auf den in Kapitel 2.1 und 2.2 erfolgten Analysen ein erster Entwurf der Unterrichtsmaterialien erarbeitet wird. Diese werden in Teaching Experiments (siehe Kapitel 2.4 und 3) überprüft und evaluiert.

### **2.2.6 Schülervorstellungen zum Arbeiten mit Diagrammen**

Die Implementation von Cosmic@Web in die Unterrichtseinheit zur Astroteilchenphysik setzt ebenfalls eine Analyse der bestehenden Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen zum Arbeiten mit Diagrammen voraus. Da dies allerdings ein so umfassendes Thema ist, wird in den folgenden Absätzen kein genereller Überblick über bestehende Probleme gegeben, sondern nur auf die für die Unterrichtseinheit und die Nutzung von Cosmic@Web bedeutsamen Hürden eingegangen.

Beichner (1994) bezeichnet das Herausarbeiten von Informationsgehalten als einen essentiellen Punkt beim Arbeiten mit Diagrammen, da Lehrer\*innen häufig im Unterricht auf diese zurückgreifen wollen (vgl. Beichner (1994), S. 750). In diesem Zusammenhang lassen sich einige Probleme durch den folgenden Punkt zusammenfassen. Schüler\*innen müssen zur Informationsgewinnung zwischen verschiedenen Darstellungsformen bzw. Informationsrepräsentationen, also Texten, Bildern und auch Diagrammen, wechseln, was den Lernenden nicht einfach fällt (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prestl (2007), S. 146). Dieser Punkt kann auch auf Cosmic@Web angewendet werden, da durch das Online Tool ebenfalls Informationen durch die erstellten Diagramme, aber auch durch Bilder (des Versuchsaufbaus etc.) sowie durch erklärende Texte gegeben werden.

Beim Arbeiten mit Diagrammen kann festgestellt werden, dass das Leistungsniveau von Lernenden mitunter starke Diskrepanzen aufweist. Lachmayer, Nerdel und Precht (2007) unterteilen die Gruppe von Schülern\*innen in Novizen, welche die dargestellten Informationen lediglich oberflächlich aufeinander beziehen, und sogenannte Experten, die Bezüge über die hinter dem Diagramm liegenden physikalischen Konzepte, wie zum Beispiel geeignete Modelle, herstellen (vgl. Lachmayer, Nerdel, Precht (2007), S. 146). Die Handhabung muss demzufolge erlernt und kann als spezifische Kulturtechnik betrachtet werden (vgl. Lachmayer, Nerdel, Precht (2007), S. 146). Um durch den Umgang mit Diagrammen eine lern- und kompetenzfördernde Wirkung zu erzielen, muss eine große Vertrautheit mit der Informationsquelle „Diagramm“ vorhanden sein, die aktiv erarbeitet werden muss (vgl. Lachmayer, Nerdel, Precht (2007), S. 146).

Ein weiteres Problem liegt in dem Zuordnen der Variablen zu den Diagrammachsen. Dabei kommt es zu Problemen hinsichtlich der Festlegung der abhängigen bzw. unabhängigen Variable (vgl. Lachmayer, Nerdel, Precht (2007), S. 154). Schüler\*innen empfinden den Zusammenhang der Abhängigkeit als nicht intuitiv und es kommt immer wieder zu falschen Belegungen. Auch die Festlegung einer Skalierung einer Variablen stellt Lernende oftmals vor Probleme (vgl. Lachmayer, Nerdel, Precht (2007), S. 152), insbesondere wenn ein Sachverhalt nicht der Erfahrungswelt der Schüler\*innen entspringt. So kann man zum Beispiel davon ausgehen, dass beim Experiment zur Analyse der Abhängigkeit der Myonenrate vom Einfallswinkel (CosMO-Mühle) die Jugendlichen Probleme mit der Akzeptanz von negativen

Einfallswinkeln haben. In diesem Fall liefert die Datensatzbeschreibung des Experiments Aufschluss über die Skalierung, diese müsste jedoch selbstständig von den Lernenden gefunden und analysiert werden. Laut Robert Beichner (1994) zeigen sich zudem Probleme beim Transfer des Auswertungs- und Interpretationsprozesses auf andere Diagramme / neue Experimente (vgl. Beichner (1994), S. 751). Dafür gibt es zwei Gründe. Lernende verlassen sich beim Interpretieren von Diagrammen häufig auf eine erlernte Abfolge von Lösungsschritten (vgl. Ivanjek et al. (2016), S. 2). Diese erlernten Denk- und Arbeitsstrukturen sind dabei vom Kontext abhängig und an diesen gebunden (vgl. Ivanjek et al. (2016), S. 2). Diese zwei Ursachen, also das an einen Kontext gebundene Wissen sowie das Verlassen auf die erlernten Arbeitsweisen verhindern den Transfer bereits vorhandenen, aber in bisher in einem anderen Kontext wahrgenommenen Wissens auf den durch das Diagramm dargestellten Sachverhalt (vgl. Ivanjek et al. (2016), S. 2).

Die folgenden Verständnisprobleme beziehen sich alle auf den Auswertungsprozess beim Arbeiten mit Diagrammen. Ein Fehler, welcher häufig in diesem Zusammenhang auftritt, ist das Verwechseln der Steigung an einem Messpunkt mit der Höhe / y-Koordinate des Punktes (vgl. Ivanjek et al. (2016), S. 1f.). So kann zum Beispiel der Punkt mit der maximalen Steigung als der höchste Punkt wahrgenommen werden, in speziellen Fällen sogar als Maximum. Dies führt dann zu einer fehlerhaften Darstellung der Experimentiererergebnisse mit einer anschließend fehlerhaften Erklärung beim Verbinden der Messdaten mit dem physikalischen Fachwissen. Ein weiterer Punkt inkludiert das durch Hopf und Schecker (2018) und Höttecke und Hopf (2018) beschriebene schlechte Empfinden bzw. die fehlerhafte Vorstellung statistischer und systematischer Messunsicherheiten (siehe Kapitel 2.1.3). Der fehlende Professionsgrad der Schüler\*innen wird als Grund für ungenaue Messungen angesehen. Dieser Punkt erlangt Relevanz beim Arbeiten mit Cosmic@Web, da diese Experimentierdaten durch Wissenschaftler\*innen, also für die Lernenden professionelle Menschen, aufgenommen wurden. Für die Jugendlichen kann dementsprechend gelten, dass die in Cosmic@Web erstellten Diagramme die hundertprozentige Wahrheit wiedergeben. Der Sinn einer Fit-Funktion und die Tatsache, dass diese gegebenenfalls von den Messpunkten abweicht, führen in der Schülervorstellung zu einem kognitiven Widerspruch. Auch könnten Schüler\*innen die Vorstellung äußern, dass Trend- oder Ausgleichsgeraden / -funktionen nur bei einem fehlerhaften Experimentieren notwendig sind.

## **2.3 Problemlöseverhalten**

Das Bearbeiten und Lösen realer, physikalischer Problemstellungen bezeichnet ein hochrangiges Ziel des Physikunterrichts und stellt dabei eine der für die Lernenden essentiell zu erlernenden Kompetenzen dar (vgl. Kück, Carmesin (2017), S. 1). Jedoch stellt man fest, dass Schüler und Schülerinnen Lösungsstrategien zur Bewältigung eines Problems eher unbewusst praktizieren, das Lösen der Probleme gestaltet sich meist intuitiv (vgl. Kück, Carmesin (2017), S. 1). Um aber die Kompetenzen im Bereich des Problemlösens und das damit verbundene Problemlöseverhalten zu fördern und weiterzuentwickeln sollten diese nach Meinung von Kück und Carmesin (2017) sich bewusst angeeignet werden (vgl. Kück, Carmesin (2017), S. 1). Aufgrund seiner hohen Relevanz für den heutigen Physikunterricht ist es das Ziel des Autors den Einsatz von Cosmic@Web problemorientiert zu gestalten. Für diese Art der Nutzung soll in dem Kapitel die Grundlagen gelegt werden, indem zunächst der Begriff des Problemlöseverhaltens allgemein definiert und anschließend in den verschiedenen Kontexten des Physikunterrichts und des Arbeitsprozesses mit Cosmic@Web diskutiert wird.

### **2.3.1 Definition des Problemlöseverhaltens**

Probleme, die von Tallman et al. (1997) als Situationen, in denen ein Hindernis existiert, welches den Akteur an dem Erreichen eines Wunschzustands hindert, und es nicht sicher ist, ob dieses Hindernis bewältigt werden kann, definiert werden (vgl. Tallman et al. (1997), S. 158), begegnen uns bei weitem nicht nur im, wie oben angesprochen, schulischen Kontext. Vielmehr muss man sich tagtäglich mit Konflikten und Problemen verschiedener Formen auseinandersetzen, woraus folgt, dass Menschen ständig auf die Fähigkeit des Problemlösens zurückgreifen müssen (vgl. Willsch (2020), S. 64), weshalb Holyoak (1995) diese als wichtigste Manifestation des menschlichen Denkens beschreibt (vgl. Holyoak (1995), S. 269).

Im allgemeinen Kontext der Verhaltenspsychologie kann das Problemlöseverhalten nun folgendermaßen definiert werden. Zwischen dem jetzigen Zustand, auch Ist-Zustand genannt, und dem Soll-Zustand besteht eine Diskrepanz (vgl. Willsch (2020), S. 64). Um diese Differenz zu überwinden und den Soll- bzw. Ziel-Zustand zu erreichen, greift der Mensch auf verschiedene kognitive Fähigkeiten zurück (vgl. Willsch (2020), S. 64) und wendet diese in der

von ihm erlernten Weise an. Die durch diese Fähigkeiten hervorgerufenen Handlungen werden als Problemlöseverhalten definiert. Das Problemlöseverhalten kann trainiert werden und die angelernten Mechanismen, welche zur Bewältigung eines Problems verwendet wurden, können eingesetzt werden, um Muster und Regelmäßigkeiten in anderen Problemsituationen zu finden, zu analysieren und das neue Problem zu lösen (vgl. Willsch (2020), S. 64f.). Tallman et al. (1997) gehen dabei einen Schritt weiter und unterteilen das Problemlöseverhalten durch ein Modell in insgesamt vier Phasen bzw. Handlungsschritte, welche an dieser Stelle beschrieben werden. Das Modell ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

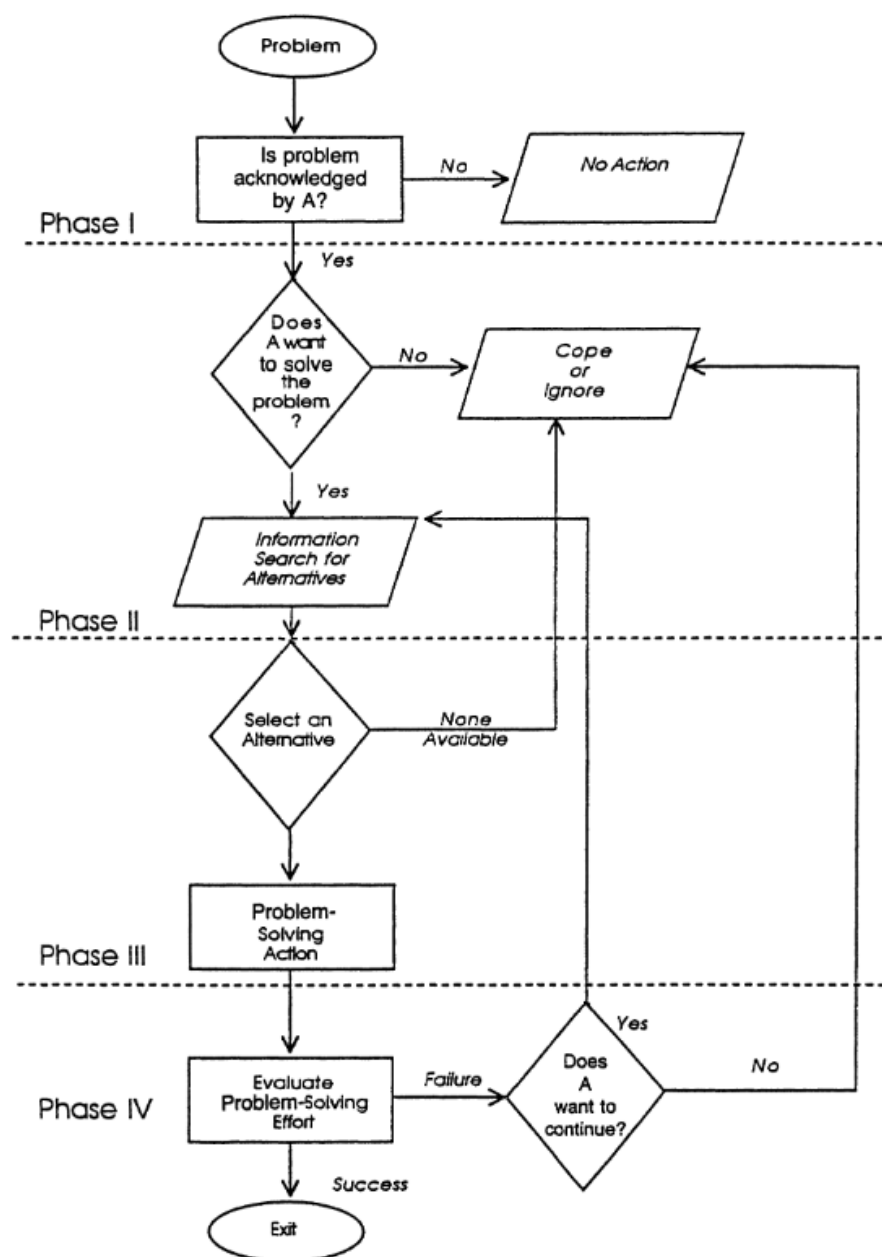


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Problemlöseverhaltens.

Probleme können existieren, ohne von der durch sie betroffenen Person wahrgenommen zu werden. In Phase 1 muss der\*die Akteur\*in erkennen, dass ein Problem vorliegt (vgl. Tallman et al. (1993), S. 159). Passiert dies nicht, so bleibt das Problem ungelöst und es findet kein Problemlöseverhalten statt (vgl. Tallman et al. (1993), S. 159). Falls die Person das vorliegende Problem jedoch erkennt, folgt die zweite Phase. In dieser erfolgt die Einschätzung des Problems hinsichtlich seiner Relevanz für den\*die Akteur\*in (vgl. Tallman et al. (1993), S. 159). Konkret stellt sich die Person die Frage, ob sie das Problem lösen möchte (vgl. Tallman et al. (1993), S. 173). Falls dies nicht der Fall ist, so geht die Person nach dem Modell in einen Zustand des Ertragens der Problemsituation (engl. cope) oder in einen Zustand des Problemignorierens (engl. ignore) über (vgl. Tallman et al. (1993), S. 173). Konkret bedeutet dies, dass der\*die Akteur\*in sich bewusst ist, dass ein Problem vorliegt, dieses wird jedoch ignoriert bzw. die Folgen des Problems werden von dem Menschen ertragen. Falls das Individuum jedoch das Problem als relevant erachtet und dieses lösen möchte, so folgt die Suche nach Informationen, geeigneten Problemlösehandlungen / -aktivitäten sowie Alternativen (vgl. Tallman et al. (1993), S. 160). Die Art der ausgeführten geistigen oder motorischen Handlungen ist dabei von der Art des Problems oder exakt formuliert von der Natur der Barriere, welche den gewünschten Zielzustand versperrt, abhängig (vgl. Tallman et al. (1993), S. 158f.). Wichtig ist zu betonen, dass diese Handlungen nicht mit völliger Sicherheit zum Erreichen des Ziel- oder Wunschzustands führen, sie werden unter den Bedingungen der Unsicherheit analysiert und hinsichtlich ihrer Erfolgswahrscheinlichkeit und dem damit verbundenen Aufwand subjektiv evaluiert (vgl. Tallman et al. (1993), S. 162). Beispiele für solche Handlungen sind das Umgehen / Entfernen eines Hindernisses oder das Bewältigen einer Aufgabe.

Wurde sich nun für eine Handlungsweise (meist diejenige mit dem besten Verhältnis zwischen der Erfolgswahrscheinlichkeit und dem mit der Handlung verbundenem Aufwand) entschieden, so beginnt die dritte Phase des Problemlöseverhaltens. Ist das Ausführen der gewünschten Aktion aus etwaigen Gründen nicht möglich, so gelangt der\*die Akteur\*in zurück in Phase 2 zum Punkt des Suchens nach Informationen, Handlungsmöglichkeiten und Alternativen (vgl. Tallman et al. (1993), S. 173). Falls die analysierte Handlungsmöglichkeit ausführbar ist, so wird diese gewählt und die Handlung wird ausgeführt. In der vierten und letzten Phase angekommen, evaluiert die Person die ausgeführte Handlung hinsichtlich ihres

Erfolgs zum Lösen des Problems, im Modell wird diese Handlung auch als Problemlösebemühung (engl. problem-solving effort) bezeichnet (vgl. Tallman et al. (1993), S. 173). Ist das Ausführen der Aktion fehlgeschlagen, so stellt sich das Individuum die Frage, ob es das Problem dennoch weiterhin lösen möchte. Falls ja, so springt es in die zweite Phase zum Punkt der Handlungs- und Informationssuche, falls nein, so gelangt es zum Punkt des Ertragens der Problemsituation bzw. die Person ignoriert das Problem (vgl. Tallman et al. (1993), S. 173). Hat die ausgeführte Handlung allerdings Erfolg, so ist das Problem gelöst und das Problemlöseverhalten ist abgeschlossen (vgl. Tallman et al. (1993), S. 173).

Zusammenfassend kann man folgendes feststellen. Problemlöseverhalten kennzeichnet eine Reihe von Handlungen und Entscheidungen, die zum Erreichen eines Zielzustands und zum Überwinden einer bestehenden Barriere beitragen (vgl. Tallman et al. (1993), S. 160). Dabei kann das Problemlöseverhalten nach dem Modell von Tallman et al. (1993) in vier Phasen untergliedert werden. Weiterhin kennzeichnet sich das Verhalten zum Problemlösen einerseits durch seine Erlernbarkeit, sowie die Übertragbarkeit auf ähnliche Problemsituationen aus. Auch kann man anmerken, dass diese Art von Verhalten stets mit dem Ausschöpfen von zur Verfügung stehenden Ressourcen, wie zum Beispiel Informationsquellen, verbunden ist.

### **2.3.2 Rolle des Problemlöseverhaltens im Physikunterricht**

Nachdem der Begriff des Problemlöseverhaltens allgemein definiert und beobachtbare Kriterien für das Analysieren von Problemlöseverhalten beschrieben wurden, kann nun der Blick auf die Rolle des Problemlöseverhaltens im schulischen Kontext des Physikunterrichts gerichtet werden. In der aktuellen Fachliteratur wird dem Problemlösen eine überaus große Rolle zugeschrieben, beispielsweise wird das Vermitteln der Fähigkeit des Problemlösens und der zugehörigen Teilkompetenzen von Didaktikern\*innen als Primärziel des naturwissenschaftlichen Schulunterrichts und als zentrales Anwendungsfeld des Fachwissens, welches im Physikunterricht erworben wurde, betrachtet (vgl. Gigl, Cauet, Kauertz (2016), S. 708). Die Schüler\*innen sollen unter dem Einsatz des Fachwissens und Heuristiken den Zielzustand erreichen, ohne dabei auf standardisierte Routinemethoden zurückgreifen zu müssen (vgl. Gigl, Cauet, Kauertz (2016), S. 708). Die aufgeführten Meinungen werden durch die

Bildungsstandards, welche durch die Kultusministerkonferenz erarbeitet wurden, bestätigt. So wird beispielsweise gesagt, dass die vier verschiedenen Kompetenzbereiche dazu dienen sollen „für das Fach typische Herangehensweisen an Aufgaben und Probleme“ (KMK (2004), S. 6) zu lehren. Weitere Erwähnungen finden sich in den Beschreibungen der Anforderungsbereiche. So wird im höchsten Anforderungsbereich die Fähigkeit des Wissenstransfers und -verknüpfung als Teilbefähigung zum Problemlösen beschrieben, welche Schüler\*innen besitzen müssen (vgl. KMK (2004), S. 13).

Obwohl dem Problemlösen und dem Problemlöseverhalten also durchaus eine hohe Bedeutung beigemessen wird, so stellt man fest, dass die Förderung der Lernenden mit dem Ziel der Verbesserung dieser Fertigkeiten einige Mängel in der Unterrichtspraxis aufweist. Für die nachfolgende Beschreibung werden Schüler\*innen nach Anlehnung an Kück und Carmesin (2017) in zwei Gruppen untergliedert: intuitive Problemlöser\*innen und nicht-intuitive Problemlöser\*innen. Dabei zeichnen sich intuitive Problemlöser\*innen dadurch aus, dass die benötigten Voraussetzungen für das Durchführen des Problemlöseverhaltens meist erfahrungsbasiert vorhanden sind und deshalb intuitiv Lösungsstrategien erarbeitet werden können (vgl. Kück, Carmesin (2017), S. 1). Die anderen Lernenden verfügen nicht über diesen Erfahrungsschatz, können also die gegebenen Probleme häufig nicht lösen. Darüber hinaus stellt man fest, dass bei fehlerhafter Schulung, Lernende ihr Problemlöseverhalten selten reflektieren und dadurch nicht den Grund für das Scheitern ableiten können (vgl. Kück, Carmesin (2017), S. 1). Zudem stellt man fest, dass selbst routinierte Schüler\*innen beim Lösen von Problemen nicht alle Ressourcen (vgl. Kück, Carmesin (2017), S. 1) und nicht das volle Spektrum an problem-solving efforts komplett ausschöpfen.

Zur aktiven Förderung des Problemlöseverhaltens existieren unterschiedliche Methoden. Problemlöseaufgaben können entweder textbasiert und -gebunden sein, sodass Schüler\*innen ihr Fachwissen auf den durch den Text beschriebenen Kontext anwenden, was meist nach dem Einführen neuer fachlicher Inhalte geschieht (vgl. Gigl, Cauet, Kauertz (2016), S. 708). Problemlösefähigkeiten, besonders im Bereich der Erkenntnisgewinnung, lassen sich über das Durchführen von Experimenten, was das Aufstellen von Hypothesen aufgrund des vorhandenen theoretischen Wissens, aber auch die anschließende Überprüfung dieser mit einem geeigneten Versuchsaufbau inkludiert, fördern (vgl. Gigl, Cauet, Kauertz (2016), S. 708).



Der Evaluationscharakter des Problemlöseverhaltens äußert sich in diesem Zusammenhang durch das Diskutieren von Messunsicherheiten und dem Rückbezug auf das physikalische Sachwissen. Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Aufgabenstrukturen zur Verbesserung des Problemlöseverhaltens ebenfalls auf Arbeitsprozesse in Cosmic@Web anwendbar sind. Textbasierte Aufgaben ähneln dabei dem Recherchieren von Hintergrundinformationen zu Experimenten, während das Erstellen und Auswerten von Diagrammen dem Durchführen eines Experiments gleichen.

### **2.3.3 Problemlöseverhalten in Bezug auf Cosmic@Web**

Die in Kapitel 2.3.1 aufgezeigten Eigenschaften und Merkmale des Problemlöseverhaltens werden nun auf den thematischen Bereich der Astroteilchenphysik, auf das Arbeiten mit Diagrammen und im speziellen auf das Arbeiten mit Cosmic@Web übertragen.

Wendet man das von Tallman et al. (1993) beschriebene Vier-Phasen-Modell des Problemlöseverhaltens auf die Möglichkeiten zur Diagrammerstellung und den damit einhergehenden Arbeitsweisen in Cosmic@Web an, so ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen. In der Astroteilchenphysik, wie auch in jeder anderen wissenschaftlichen Disziplin, ergeben sich Probleme durch Unverständnis und den Wunsch neues Wissen zu erschließen. In diesem Fall wird das Vorhandensein eines Problems über eine Forschungsfrage zum Ausdruck gebracht, die untersucht und beantwortet werden muss. Das „Erkennen des Problems“ (vgl. Tallman et al. (1993)) kann dabei entweder über das selbstständige Formulieren dieser Frage erfolgen, es kann aber auch durch das Geben einer Aufgabenstellung (ggf. durch die Lehrperson) im Zusammenhang mit der Analyse dieser Handlungsanweisung geschehen.

Aufgrund des Anreizes, bisher unbekannte Fachinhalte über das Beantworten der Forschungsfrage zu erschließen, und wegen der hohen Motivation, die durch das Behandeln astronomischer und teilchenphysikalischer Themenkomplexe hervorgerufen wird, haben Schüler\*innen den Wunsch das Problem zu lösen. Damit muss der „cope or ignore“-Teil (vgl. Tallman et al. (1993), S. 173) fürs erste nicht beachtet werden. Dieser wird erst wieder relevant, wenn mehrere Lösungsversuche und in deren Zusammenhang durchgeführten

Handlungsstrategien (problem-solving actions) fehlschlagen. Daraufhin könnte es passieren, dass sich bei den Lernenden Resignation einstellt und das Problemlösen dadurch seinen Anreizfaktor verliert und ungelöst bleibt. Wie werden nun die zweite und dritte Phase auf diesen Themenbereich übertragen? Allgemein formuliert findet in diesen beiden Phasen das Heraussuchen, Analysieren und Ausführen von zur Lösung des Problems geeigneten Handlungen statt. Im Kontext der Astroteilchenphysik entsprechen diese beiden Phasen folglich dem wissenschaftlichen Arbeitsprozess der Recherche und des Experimentierens (im Falle von Cosmic@Web der Diagrammerstellung und -auswertung). Wie bereits in Kapitel 2.2.5 beschrieben, empfinden Lernende diesen Prozess als authentisch und wissenschaftsnah.

In diesem Zusammenhang stellt sich als nächstes die Frage, wie sich das Suchen nach Informationen, möglichen Handlungen und Alternativen gestaltet. Im Zusammenhang des Arbeitens mit Diagrammen werden sich die Lernenden in dieser Phase ihres Problemlöseverhaltens wahrscheinlich für das Recherchieren für das Experiment relevanter Hintergrundinformationen entscheiden. Dies kann zum Beispiel intern über die Experiments-Informationsseiten in Cosmic@Web geschehen oder aber über andere im Internet verfügbare Quellen, wie zum Beispiel Leifi-Physik. Mit diesen Hintergrundinformationen können die Handlungen zum Erstellen des Diagramms, also Auswahl des Diagrammtyps, Festlegen der Variablen und Zuordnung zu den Diagrammachsen, eingeschätzt und evaluiert werden. Anschließend wird das Diagramm erstellt, was dem ersten Teil des Ausführens der Problemlöseaktion entspricht. Man stellt fest, dass nach dem Erstellen des Diagramms noch die anschließende Interpretation folgen muss. Erst durch diesen zweiten Lösungsschritt, der im Vorhinein wieder recherchiert und abgewogen wird, kann der Inhalt des Diagramms mit dem physikalischen Wissen verknüpft und zur Beantwortung der Frage eingesetzt werden.

Der letzte Schritt, das Evaluieren der Problemlösebemühungen, funktioniert beim Arbeiten mit Diagrammen in Cosmic@Web über mehrere Möglichkeiten. Entweder der\*die Lernende schätzt den Erfolg aufgrund des eigenen Leistungsniveaus und Wissens selbst ein, er\*sie bekommt über andere Gruppenmitglieder Feedback (bei den bisherigen Forschungen zu Cosmic@Web arbeiteten die Lernenden stets in einer Gruppe), er kann aber auch über die in Cosmic@Web aufgeführten Beispieldiagramme, sofern diese für den jeweiligen Sachverhalt vorhanden sind, seine\*ihre Lösung kontrollieren und bewerten. Eine letzte

Evaluationsmöglichkeit, die vor allem im schulischen Kontext bedeutsam ist, besteht in dem Erfragen des Feedbacks bei einer Lehr- oder Fachperson. Bei vorangegangenen Versuchen mit Cosmic@Web waren stets Physiklehrkräfte und Wissenschaftler\*innen anwesend, die Feedback gaben und damit die Leistung der Jugendlichen einschätzten. Für die Materialien des Unterrichtskonzepts sowie für dessen Ablauf muss folglich darauf geachtet werden, dass diese beschriebenen Phasen nicht beeinträchtigt werden. Ausführliche Überlegungen zu diesem Punkt sind in Kapitel 3.1 aufgeführt.

Dieser Abschnitt der Arbeit verdeutlichte, welche große Rolle dem Problemlösen und dem Problemlöseverhalten im heutigen Physikunterricht beigemessen wird. Auch wurde skizziert, inwieweit Cosmic@Web die strukturellen Hintergründe besitzt, um die Problemlösefähigkeiten von Schülern\*innen zu verbessern. In der zu konzipierenden Unterrichtseinheit zur Astroteilchenphysik soll deshalb das Problemlöseverhalten über die Arbeit mit Cosmic@Web gefördert werden.

## **2.4 Untersuchungsmethode: Teaching Experiment**

Die bisher erfolgte fachliche und didaktische Analyse ergaben die folgenden Schlüsse. Es existieren zwar Implementationsversuche, bei denen Schüler\*innen bereits mit Cosmic@Web arbeiteten und das Tool als authentisch, interessant und das Themengebiet der Astroteilchenphysik als motivierend empfanden. Jedoch fanden diese nicht in dem Kontext einer klassischen Unterrichtseinheit, sondern in Projektwochen, Praktika oder Online-Workshops statt. Folglich müssen die auf der bisher gelegten Grundlage erstellten Materialien (siehe Anhang A.3) sowie der bisher erdachte Verlauf der Unterrichtseinheit empirisch erforscht werden. In dem folgenden Kapitel wird deshalb die verwendete Forschung charakterisiert sowie deren Beitrag zum Physikunterricht allgemein erörtert.

Die Forschungsgrundlage für das am Ende dieser Arbeit präsentierte Unterrichtskonzept bilden die sogenannten Teaching Experiments, welche in den 1980er Jahren von Jung und Wiesner entwickelt wurden (vgl. Burde (2018), S. 127). Diese dienen dazu Lernschwierigkeiten und Verständnisprobleme der Schüler\*innen in den unterschiedlichen Teildisziplinen der Physik zu erkennen, zu untersuchen sowie zu analysieren und erfüllen damit einen zentralen

Aspekt der physikdidaktischen Forschung (vgl. Burde (2018), S. 127). Bei Teaching Experiments, welche in der Fachliteratur auch als Akzeptanzbefragungen bezeichnet werden, handelt es sich um „eine qualitative fachdidaktische Forschungsmethode zur gezielten Erprobung von neuen Lehrkonzeptionen“ (Burde (2018), S. 127) mit einem explorativen Charakter.

Dementsprechend soll vor der Entwicklung des Unterrichtskonzeptes zuerst erforscht werden, in welchem Umfang die Schüler\*innen die Grundideen der konzipierten Lerninhalte verstehen (vgl. Burde (2018), S. 127). Das Ziel der Teaching Experiments besteht darin, Einblicke in die Lernprozesse der Jugendlichen zu erhalten und vorhandene Lernschwierigkeiten zu erkennen (vgl. Burde (2018), S. 127). Über das Teaching Experiment sollen ebenfalls die in der Einleitung genannten Forschungsfragen untersucht und ausgewertet werden. Die gesammelten Erkenntnisse sollen später inklusive der passenden Arbeitsmaterialien in das Unterrichtskonzept einfließen.

#### **2.4.1 Kriterien beim Erstellen von Teaching Experiments**

Teaching Experiments bezeichnen das Durchführen von Lehr-Lern-Interviews mit entweder einzelnen Schülern\*innen oder einer kleinen Gruppe unter möglichst kontrollierbaren Bedingungen (vgl. Burde (2018), S. 127). In diesem Interview wird versucht zu erfahren, in welchem Umfang ein physikalischer Erklärungsansatz von den Lernenden akzeptiert und begriffen wird (vgl. Burde (2018), S. 127). Dies äußert sich in dem Beobachten der Reaktionen der Schüler\*innen auf erteilte Instruktionen, welche auf Grundlage des bereits vorhandenen Wissens über die in dem zu untersuchenden Themenkomplex bereits erforschten Lernschwierigkeiten sowie Schülervorstellungen, erstellt wurden (vgl. Burde (2018), S. 127). Die Rolle des\*r Forschers\*in wird dabei von der lehrenden Person ausgefüllt. Die Lehrperson untersucht „die Schülerreaktionen auf die Lernangebote [...], um bereits verständliche Lernangebote zu identifizieren und potenzielle Lernhemmnisse aufzudecken, um so Ansatzpunkte zur Verbesserung des Konzepts zu finden.“ (Burde (2018), S. 127) Die bereits angesprochene geringe Anzahl der teilnehmenden Schüler\*innen ergibt sich in der Folge aus dem Bestreben die Nachvollziehbarkeit der Lernprozesse möglichst detailliert zu gestalten, sodass eine ausführliche Analyse möglich ist (vgl. Burde (2018), S. 127). Gegenüber dem

regulären Schulunterricht grenzen sich die Teaching Experiments in den von Wodzinski ((1996), S. 42) beschriebenen Punkten ab.

- 1 Die Lernenden kommunizieren nicht untereinander.
- 2 Das Vermitteln der fachlichen Inhalte erfolgt in einer komprimierten Form.
- 3 Die befragten Schüler\*innen besitzen eine höhere Motivation und Konzentration.
- 4 Die Lehrperson ist in der Lage besser auf individuelle Schwierigkeiten der Teilnehmenden eingehen zu können.

Unter diesen Kriterien gestaltet sich der von Wodzinski ((1996), S. 41) beschriebene prinzipielle Ablauf einer Einheit im Teaching Experiment wie folgt.

- 1 Informationsangebot: „Der Interviewer erklärt dem Lernenden in mündlicher Form ggf. unterstützt durch Grafiken und Experimente einen physikalischen Sachverhalt.“ (Burde (2018), S. 128)
- 2 Frage nach Akzeptanz: „Der Lernende gibt Auskunft darüber, inwiefern die Erklärung seiner Meinung nach verständlich bzw. plausibel ist.“(Burde (2018), S. 128)
- 3 Paraphrasierung: „Der Lernende gibt mit eigenen Worten die gehörte Erklärung wieder, während der Interviewer auf Auslassungen und Transformationen achtet und diese notiert.“ (Burde (2018), S. 128)
- 4 Anwendung / Übung: „Im letzten Schritt besteht die Aufgabe des Befragten darin, das neu Gelernte auf ein passendes Beispiel anzuwenden.“ (Burde (2018), S. 128)

Dieser prinzipielle Ablauf kann gegebenenfalls auch abgeändert werden, dies hängt dabei maßgeblich von den zu erforschenden Variablen ab. Weitere Kriterien, welche die Teaching Experiments erfüllen müssen, sind die folgenden. Für die Überprüfbarkeit eines Lernprozesses, müssen vor der Durchführung der Akzeptanzbefragungen Lernziele definiert werden. Deren Erfüllung soll klar beobachtbar und damit evaluierbar sein. Auch die zugrunde liegenden Forschungsfragen, auf denen die vorher stattgefundene Analyse und das Teaching Experiment aufbaut, sollten so formuliert sein, dass die darin beschriebenen Variablen operationalisiert werden können. Das Erfüllen bzw. Nicht-Erfüllen dieser Variablen muss für die Lehrperson beobachtbar sein und schriftlich festgehalten werden.

### 2.4.2 Evaluation der Teaching Experiments

Im Folgenden werden allgemeine Möglichkeiten zur Auswertung und zur Evaluation von Teaching Experiments beschrieben. Auch auf geeignete Erhebungsinstrumente wird in diesem Zusammenhang eingegangen. In der Auswertungsphase kann das Augenmerk auf mehrere Ansatzpunkte für die Evaluation gerichtet werden. Der erste Ansatzpunkt beschreibt die Akzeptanz der Grundideen, d.h. die Schüler\*innen beschreiben, inwiefern ihnen die dargebrachten Lerninhalte logisch und sinnvoll erscheinen oder ob die von der Lehrperson durchgeführten Erklärungen Unverständnis hervorriefen bzw. weitere Fragen aufwarfen. Dabei findet im Vorhinein eine Definition verschiedener Akzeptanzstufen statt. Nach dem Vorbild von Burde (2018) wird dabei zwischen vollständiger, teilweiser und keiner Akzeptanz, auch als Ablehnung bezeichnet, unterschieden. Die Definitionen der Akzeptanzstufen sind in Kapitel 4.1.1 dargestellt.

Die Paraphrasierung stellt einen zweiten Indikator für die Evaluation der Akzeptanzbefragungen dar. Analog zu den vorher definierten verschiedenen Stufen der Akzeptanz können auch das Gelingen und die Vollständigkeit der von den Teilnehmer\*innen gegebenen Paraphrasierung unterteilt werden. Burde (2018) unterscheidet dabei zwischen gelungener, befriedigender und mangelhafter Paraphrasierung (siehe Kapitel 4.1.1). Das Überprüfen der von den Schülern\*innen bearbeiteten Übungsaufgaben auf deren Richtigkeit und Vollständigkeit kann ebenfalls als möglicher Ansatz herangezogen werden. Konkret ausgedrückt ist die Fehleranzahl ein möglicher Indikator für das Unverständnis der Lernenden, es muss jedoch beachtet werden, dass der vom Teilnehmenden gemachte Fehler auch aufgrund einer ungenauen oder schlecht formulierten Aufgabenstellung hervorgerufen wurde. Dementsprechend sollte die gegebene Antwort mündlich erfragt und durch den\*die Lernende\*n begründet werden.

Im Zusammenhang mit den vorher festgelegten Lernzielen (siehe Kapitel 3.1) und den zugrundeliegenden Forschungsfragen können weitere Parameter beobachtet und analysiert werden. Diese sind jedoch speziell an das vom Autor entwickelte Teaching Experiment angepasst und werden an anderer Stelle beschrieben (siehe Kapitel 3.3, 3.4)

Für die Auswertung und Evaluation der Akzeptanzbefragungen werden im Vorhinein geeignete Erhebungsinstrumente ausgewählt. Aufgrund der von ihnen festgehaltenen und damit analysierbaren Daten erfolgt die Auswertung der bereits genannten Punkte. Grundsätzlich werden alle Teaching Experimente mit dem Ziel einer detailreichen Auswertung durch ein Diktiergerät aufgezeichnet sowie vom Autor transkribiert. Die Transkription legt die inhaltliche Grundlage, auf die beim Auswerten der Teaching Experiments, also beim Beschreiben von Lernschwierigkeiten o.ä. verwiesen werden kann. Beim Erstellen der Transkripte müssen jedoch mehrere Dinge beachtet werden. Die volle Gesprächssituation, also sprachliche Facetten, wie die Tonlage oder Sprachtempo, können durch ein schriftliches Transkript nicht zum Ausdruck gebracht werden. Auch nonverbale Signale werden durch diese Form der Datenerfassung vernachlässigt. Das Ziel besteht darin, einen Kompromiss zwischen dem Detailgrad des Gesprächs zwischen Interviewer und den Teilnehmenden und der Lesbarkeit zu finden, es soll also eine dem Zweck der Auswertung angepasste Rekonstruktion der Akzeptanzbefragungen möglich machen. Die in den Transkriptionen verwendeten Symbole sind am Anfang der jeweiligen Transkription in einer Legende aufgeführt.

#### **2.4.3 Beitrag des Teaching Experiments zum Physikunterricht**

Das Entwickeln und das empirische Überprüfen neuer Vermittlungsstrategien und Unterrichtsansätze stellt einen Kernpunkt der physikdidaktischen Forschung dar (vgl. Burde (2018), S. 127). Besonders im Fokus steht dabei die Untersuchung des Verständnisses verschiedener Darstellungen, Modelle oder Analogien zu verschiedenen physikalischen Größen. Auf der Grundlage der in den Teaching Experiments erfolgten Datensammlungen und Beobachtungen erhalten Forscher\*innen Einblicke in Gedanken- und Lernprozesse der Jugendlichen. Durch das Zusammenführen der auf den Einblicken aufbauenden Schlussfolgerungen und der bereits erwähnten Identifikation von fehlerhaften Schülervorstellungen kann im Anschluss ein Unterrichtskonzept mit passenden Lehr- und Lernmaterialien konzipiert werden.

In der didaktischen Forschung werden Akzeptanzbefragungen seit den 1980er Jahren zur empirischen Erforschung von Unterrichtskonzepten eingesetzt (vgl. Burde (2018), S. 127f.). Die Fachliteratur schreibt der Methode der Akzeptanzbefragung dabei eine hohe Effektivität beim

Erreichen dieser Ziele zu und es existieren mehrere Beispiele bei denen auf Grundlage von Akzeptanzbefragungen erfolgreiche Unterrichtsansätze entwickelt wurden, wie zum Beispiel Wodzinski (1996) (vgl. Burde (2018), S. 128).

Für die Entwicklung einer Unterrichtseinheit zur Astroteilchenphysik unter dem Einsatz von Cosmic@Web bietet sich der Forschungsansatz der Teaching Experiments dementsprechend als geeignetes Instrument zur Evaluation eines ersten Entwurfs an. Die in diesem Design-basierten Forschungsprozess gewonnenen Erkenntnisse dienen anschließend als Grundlage für das Re-Design der Unterrichts- und Arbeitsmaterialien.



### **3      Untersuchung**

In diesem Kapitel der Staatsexamensarbeit wird die Durchführung der Teaching Experiments analysiert. Dies beinhaltet die Beschreibung des Studiendesigns, die Erläuterung der grundlegenden Forschungsfragen sowie deren Operationalisierung, aber auch die Analyse der Rahmenbedingungen sowie die abschließende Reflexion der Akzeptanzbefragungen.

#### **3.1      Studiendesign**

Der Begriff der empirischen Evaluationsstudie im Sinne des Design Based Research (DBR) bezeichnet das Untersuchen der Wirksamkeit einer eingesetzten Maßnahme (vgl. Universität Hamburg), in diesem Fall der Einsatz von Cosmic@Web. Für das Durchführen einer DBR-Forschung können die von McKenny und Reeves (2019) im generischen Modell genannten drei Hauptphasen zu Rate gezogen werden.

1. Phase: analysis and exploration - Grundlagenanalyse und Einarbeitung
2. Phase: design and construction - Design und Konstruktion
3. Phase: evaluation and reflection - Evaluation und Reflexion

An dieser Stelle muss noch das Folgende angemerkt werden: Im Rahmen von Design basierten Studien erfolgt meist nach der einleitenden Analyse und Explorationsphase das Durchführen einer oder mehrerer Pilotstudien. Nach Durchführung der einzelnen Pilotstudien werden diese analysiert und evaluiert, sodass am Ende des Forschungsprozesses die Umsetzung der Hauptstudie folgt. Aufgrund des limitierten Zeitumfangs, welcher diese Arbeit begleitet, wird sich im Rahmen dieser Arbeit lediglich auf die Durchführung einer ersten Pilotstudie fokussiert.

#### **Grundlagenanalyse und Einarbeitung**

Die Einsicht in die aktuelle Fachliteratur lässt folgende Schlüsse zu: In der Astroteilchenphysik und vor allem bei dem Arbeiten mit Cosmic@Web treffen zwei motivationale Gegensätze aufeinander. Schüler und Schülerinnen finden auf der einen Seite Themen, welche in der Astronomie oder in der Teilchenphysik beheimatet sind, sehr interessant (vgl. Lindenau

(2015), S. 5f.). Das Verstehen der elementaren Prozesse in unserem Universum stellt dabei einen großen Anreizfaktor für die Lernenden dar (vgl. Lindenau (2015), S. 5). Auf der anderen Seite des Arbeitens mit Cosmic@Web steht jedoch der Umgang mit physikalischen Diagrammen, welcher die Jugendlichen häufig vor Probleme stellt (vgl. Lachmayer, Nerdel, Prechtel (2007), S. 145). Die vielfach in der Literatur beschriebenen Lernschwierigkeiten beim Umgang mit Diagrammen können bei wiederholtem Nichtlösen von Arbeitsaufträgen internal attribuiert werden. Betrachtet man die „Bestimmung des Selbstwertes entsprechend der Wahrnehmung der eigenen Fähigkeit“ (Mietzel (2017), S. 492), so stellt man fest, dass Jugendliche bei drohenden Misserfolgen es vorziehen, sich nicht eingehend mit der Materie auseinanderzusetzen (vgl. Mietzel (2017), S. 492). Mietzel (2017) beschreibt weiterhin, dass Jugendliche es vorziehen, Schuldgefühle, welche durch ein Nichtstun ausgelöst werden, zu ertragen anstatt Schamgefühle, die durch ein Versagen, obwohl sich der\*die Lernende anstrenge, entstehen, zu empfinden (vgl. Mietzel (2017), S. 492). Wendet man diese Überlegung auf den hier vorliegenden Kontext an, dann folgt, dass die interne Attribution die Motivation der Schüler\*innen beim Umgang mit dieser Art der Informationsdarstellung beeinträchtigen könnte. Oftmals folgen die Lernenden bei diagrammorientierten Arbeitsprozessen einem Algorithmus, also einer erlernten Abfolge von Arbeitsschritten zur Lösung einer gestellten Aufgabe (vgl. Ivanjek et al. (2016), S. 2). Der eigentliche Sinn der graphischen Darstellungen, nämlich das problemorientierte und nicht routinemäßige Nutzen der visuell veranschaulichten Informationen zum Ergründen wissenschaftlicher Fragestellungen, gerät dabei in den Hintergrund.

Beim Arbeiten mit Cosmic@Web werden diese beiden Punkte miteinander verbunden. Anknüpfend an die Analyse der Forschungsliteratur von Schwerdt et al. (2020) und Lindenau, Schwerdt, Walter (2021) muss der Fokus in den Teaching Experiments und der darauf aufbauenden Unterrichtseinheit vor allem auf dem Erforschen wissenschaftlicher Fragen liegen. Cosmic@Web und die Diagramme müssen als ein wissenschaftliches Hilfsmittel präsentiert werden, welches die Lernenden nutzen können, um die Eigenschaften der kosmischen Strahlung zu untersuchen. Diese Rolle von Cosmic@Web wird ebenfalls in dem von DESY erstellten Einführungsvideo betont (vgl. DESY-Erklärvideo), welches die hier geäußerte Annahme stützt.

Weiterhin kann man feststellen, dass nur wenig Literatur zum Einsatz von Cosmic@Web zur Gestaltung von Lernsituationen und -prozessen existiert. Bisher wurde Cosmic@Web vor allem als Arbeitsmittel in Projektarbeiten bzw. Projektwochen genutzt. Die in Kapitel 2.2.4 erwähnte Literatur von Schwerdt et al. (2020) sowie Lindenau, Schwerdt und Walter (2021) skizziert die überwiegend positiven Erfahrungen der Lehrkräfte und der Schüler\*innen beim Umgang mit Cosmic@Web innerhalb der Projektwoche zur Erforschung kosmischer Teilchen bzw. innerhalb eines digitalen Workshops und bestätigen ebenfalls die in Kapitel 2.2 erfolgte didaktische Analyse des Online-Tools. Vor allem die durch die Bildungsstandards beschriebenen Kompetenzen (vgl. KMK (2020)) im Bereich der Kommunikation und der Erkenntnisgewinnung werden durch das Arbeiten mit Cosmic@Web bedingt und gefördert. Die folgende Tabelle liefert einen generellen Überblick.

Kompetenzbereich	Kompetenz	Die Lernenden...
Erkenntnisgewinn	E1	„identifizieren und entwickeln Fragestellungen zu physikalischen Sachverhalten“ (KMK (2020), S. 15)
	E4	„modellieren Phänomene physikalisch, auch mithilfe mathematischer Darstellungen und digitaler Werkzeuge, wobei sie theoretische Überlegungen und experimentelle Erkenntnisse aufeinander beziehen“ (KMK (2020), S. 15)
	E6	„erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen oder recherchierten Daten gefundenen Strukturen und Beziehungen“ (KMK (2020), S. 15)
Kommunikation	K1	„recherchieren zu physikalischen Sachverhalten zielgerichtet in analogen und digitalen Medien und wählen für ihre Zwecke passende Quellen aus“ (KMK (2020), S. 16)
	K3	„entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder“ (KMK (2020), S. 17)
	K5	„wählen ziel-, sach- und adressatengerecht geeignete Schwerpunkte für die Inhalte von Präsentationen, Diskussionen oder anderen Kommunikationsformen aus“ (KMK (2020), S. 17)
	K6	„veranschaulichen Informationen und Daten in ziel-, sach- und adressatengerechten Darstellungsformen, auch mithilfe digitaler Werkzeuge“ (KMK (2020), S. 17)

	K7	„präsentieren physikalische Sachverhalte sowie Lern- und Arbeitsergebnisse sach-, adressaten- und situationsgerecht unter Einsatz geeigneter analoger und digitaler Medien“ (KMK (2020), S. 17)
Sachkompetenz	S1	„erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien“ (KMK (2020), S. 14)
	S2	„erläutern Gültigkeitsbereiche von Modellen und Theorien und beschreiben deren Aussage- und Vorhersagemöglichkeiten“ (KMK (2020), S. 14)
	S5	„erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus“ (KMK (2020), S. 14)
	S6	„erklären bekannte Auswerteverfahren und wenden sie auf Messergebnisse an“ (KMK (2020), S. 14)

*Tabelle 3: Sämtliche mit Cosmic@Web verbundene Kompetenzen.*

Ausgehend von den bisherigen Forschungen zu Cosmic@Web wird an dieser Stelle eine Grobstrukturierung der Akzeptanzbefragungen vorgenommen. Die Struktur der bisherigen Einsätze bestand im Wesentlichen aus drei Teilen: einem einführenden Teil, dessen Bedeutung und Wichtigkeit explizit durch die Autoren hervorgehoben wurde (vgl. Schwerdt et al. (2020), S: 29), der Arbeitsphase mit Cosmic@Web und einem Präsentationsteil, in welchem die Forschungsergebnisse vorgestellt werden (vgl. Schwerdt et al. (2020), S. 28f.). Für die Teaching Experiments kann eine ähnliche Struktur erdacht werden, auch hier bietet sich ein Einführungspart an, der die fachlichen Grundlagen erörtert. In einem anschließenden Part kann dann das Arbeiten mit Cosmic@Web erfolgen.

Im Unterschied zu den bisherigen Einsätzen wird für die Teaching Experiments ein zusätzlicher Schwerpunkt ergänzt, in welchem das Arbeiten mit Diagrammen wiederholt wird. Durch das unterschiedliche Leistungsniveau der Schüler\*innen wird so gewährleistet, dass alle Lernenden über den für die Arbeit mit Cosmic@Web benötigten Kenntnisstand verfügen. In den folgenden Phasen kann anhand der Beschreibung der Zielgruppe, der Lernziele und der Designprinzipien dieser grobe Aufbau spezifiziert werden. Die endgültige Struktur der Akzeptanzbefragungen ist in Kapitel 3.4 dargestellt.

## Design und Konstruktion

Auf Grundlage der gesichteten Literatur, der fachlichen Analyse astroteilchenphysikalischer Lerninhalte sowie der didaktischen Analyse von Cosmic@Web werden in den folgenden Absätzen die Zielgruppe und die Lernziele für die Teaching Experiments beschrieben. Auch die Grundgedanken beim Festlegen des strukturellen Designs der Akzeptanzbefragungen als auch beim Erstellen der Arbeitsmaterialien werden beleuchtet.

Als Faktoren, die das Unterrichtskonzept und die damit einhergehende Zielgruppe an Lernenden bestimmen, sind einerseits die zur Verfügung stehende Unterrichtszeit, aber auch die für das Thema essentiellen Vorkenntnisse zu nennen. Der sächsische gymnasiale Physikunterricht umfasst in der Sekundarstufe I jeweils zwei Unterrichtsstunden pro Woche, also insgesamt 90 Minuten. In der Sekundarstufe II ist die Unterrichtszeit von der Wahl der Art des Kurses abhängig. Die Unterrichtszeit im Grundkurs beträgt ebenfalls 90 Minuten, im Leistungskurs sind es hingegen fünf Wochenstunden, also 225 Minuten. Es muss angemerkt werden, dass die Astroteilchenphysik kein expliziter Bestandteil des sächsischen gymnasialen Lehrplans im Fach Physik ist.

Das Vermitteln fachlicher Inhalte aus der Astroteilchenphysik setzt mehrere Kenntnisse voraus. Darunter zählen zum Beispiel die Grundaussagen des Standardmodells der Elementarteilchen, die ionisierende Wirkung elektrisch geladener Teilchen, aber auch das Wissen um Exponentialfunktionen zur Modellierung von Zerfallsprozessen aus dem Bereich der Mathematik, diese werden zum Beispiel für die Auswertung des LiDO-Experiments benötigt. Da in der neunten Klassenstufe die Radioaktivität behandelt wird, bietet sich zwar an dieser Stelle ein möglicher Anknüpfungspunkt für die Astroteilchenphysik an, jedoch erfolgt das Behandeln exponentieller Wachstums-/Zerfallsprozesse erst in Klassenstufe 10 (vgl. SMK (2021), S. 28f.). Folglich wurde sich dazu entschieden, Schüler und Schülerinnen aus der zehnten Klassenstufe als Teilnehmer für die Teaching Experiments anzuwerben. Ein weiterer Grund dafür ist der dritte Lernbereich aus der eben genannten Klassenstufe „Kosmos, Erde, Mensch“ (SMK (2022), S. 31). Die Astroteilchenphysik kann thematisch lückenlos an diesen anknüpfen und die dort gelegten Grundlagen erweitern.

Ein von Lindenau, Schwerdt und Walter (2021) erstelltes Paper beleuchtet zudem die Möglichkeit des Anknüpfens an Inhalte der Speziellen Relativitätstheorie im Leistungskurs, zum Beispiel die relativistische Zeitdilatation (vgl. Lindenau, Schwerdt, Walter (2021), S. 3). Diese kann durch das LiDO-Experiment im Zusammenhang mit der Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen behandelt werden. Es wurde sich jedoch gegen diese Variante der Implementation aufgrund des in der Abiturstufe herrschenden Zeitdrucks entschieden. Abiturrelevante Themeninhalte können in diesen Klassenstufen nicht gekürzt werden, was eine praktische Implementation sehr unwahrscheinlich machen würde. Da sich also für eine Implementation in die 10. Klassenstufe entschieden wurde, ist die Nutzung des einfachen Modus zur Diagrammerstellung von Vorteil. Der erweiterte Modus zur Diagrammerstellung und seine den Lernenden bis dahin unbekannten Funktionen zum Erstellen von Korrektur- und Fitfunktionen sorgen für ein ungleiches Verhältnis zwischen der mit dieser Arbeitsweise einhergehenden Komplexität und dem Leistungsstand der Lernenden.

Das Hauptziel der Akzeptanzbefragungen besteht in dem Testen und Evaluieren der erdachten inhaltlichen Unterrichtsstruktur sowie im Einschätzen der Verwendbarkeit der erstellten Arbeitsmaterialien. Für den Umgang mit Cosmic@Web ergeben sich die folgenden Lernziele:

1. Die Schüler\*innen sind in der Lage mit Cosmic@Web geeignete Diagramme zur Untersuchung wissenschaftlicher Experimente zu erstellen.
2. Die Schüler\*innen sind in der Lage die erstellten Diagramme unter Rückbezug des physikalischen Wissens fachlich korrekt zu interpretieren.
3. Die Schüler\*innen nutzen die Fit-Funktionsmethode zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer eines Myons.
4. Die Schüler\*innen formulieren qualitative Zusammenhänge zur Abhängigkeit der Myonenrate und dem Einfallswinkel / der Temperatur.
5. Die Schüler\*innen erklären die relativistischen Eigenschaften von Myonen.

Der Erwartungshorizont zum Erreichen der Lernziele 2-5 ist über die Musterlösungen der Arbeitsmaterialien einsehbar. Das Erreichen des ersten Lernziels kann dabei über den Vergleich der von den Lernenden erstellten Diagramme mit den Musterdiagrammen (siehe Anhang A.5) evaluiert werden.

Die Grundsätze für das Design der Akzeptanzbefragungen orientieren sich an Meyers 10 Merkmalen für guten Unterricht (vgl. Meyer (2006)). An geeigneten Stellen erfolgt das Nutzen weiterer Modelle, welche an den jeweiligen Punkten beschrieben werden. Das Teaching Experiment kann ausgehend von der fachlichen und didaktischen Analyse in zwei Teile gegliedert werden, wobei der erste Teil zum Legen der fachlichen Grundlagen dient und der zweite Part das Arbeiten mit Cosmic@Web aktiv erforscht. Kriterien, an denen sich beim Gestalten des ersten Teils orientiert wurde und die deshalb großen Einfluss auf das Design des ersten Teils haben, sind das intelligente Üben (vgl. Meyer (2006), S. 78) und die inhaltliche Klarheit (vgl. Meyer (2006), S. 78). Die inhaltliche Klarheit äußert sich in den von Meyer (2006) beschriebenen Kriterien der fachlichen Kompetenz der Lehrperson, insbesondere in den Erklärphasen, aber auch beim Beantworten der Rückfragen der Teilnehmer\*innen oder dem Eingehen auf stabile Alltagserfahrungen (vgl. Meyer (2006), S. 81) / Schülervorstellungen, und dem Nutzen von Veranschaulichungen während der Erklärphase. Die Kriterien der verständlichen Aufgabenstellungen (vgl. Meyer (2006), S. 81) könnten ebenfalls als Designprinzip genannt werden, da die Materialien jedoch mit Hilfe der Akzeptanzbefragungen erst evaluiert werden sollen, kann dies nur eingeschränkt geschehen.

Auch soll eine ruhige und konzentrierte Atmosphäre geschaffen werden, die den Teilnehmenden die Möglichkeiten zum Ansprechen der Lehrkraft und des Stellens von Rückfragen ermöglicht. All diese Punkte bilden die methodische Grundlage des ersten Parts. Durch die kleine Gruppe an Schülern\*innen ist die ruhige Atmosphäre vergleichsweise leicht herzustellen und ebenfalls begünstigt diese minimalistische Gruppenkonstellation, bestehend aus ein bis zwei Lernenden und der Lehrperson, die Möglichkeit zum Ansprechen der Lehrkraft und Klären eventueller Unklarheiten sowie fachlicher Fragen.

In dem zweiten Teil dienen diese beiden Ansatzpunkte ebenfalls als Grundpfeiler zum Festlegen des Designs, jedoch müssen beim Arbeiten mit Diagrammen und Cosmic@Web zusätzliche Konzepte herangezogen werden. Zum Beispiel dient das von Lachmayer, Nerdel und Precht (2007) beschriebene Modell zum Arbeiten mit Diagrammen als struktureller Leitfaden, an dem sich die Arbeitsphase des Diagrammerstellens und -auswertens orientiert. Des Weiteren orientiert sich das Design dieses Parts an dem wissenschaftlichen Prozess zum Untersuchen von Forschungsfragen mit Hilfe von Experimenten / Diagrammen. Es werden

ebenfalls Ansatzpunkte der durch Meyer (2006) beschriebenen 10 Merkmale guten Unterrichts verwendet. Dazu zählen die vorbereitete Umgebung (vgl. Mayer (2006), S. 78), die sich in dem Verwenden von internetfähigen Computern zum Recherchieren und Nutzen von Cosmic@Web äußert, sowie das lernförderliche Klima (vgl. Mayer (2006), S. 78), indem die Lernenden offen ihre Aufgabenlösungen, Gedankenvorgänge, aber auch ihre Schwierigkeiten kommunizieren können.

Im Rahmen der Teaching Experiments wurden mehrere Arbeitsmaterialien (siehe Anhang A.4, A.6) vom Autor selbst erstellt. Dies inkludiert drei Arbeitsblätter, zwei Protokolle sowie einen selbsterstellten Text und einen wortwörtlich übernommenen Textabschnitt aus dem dritten Band „Kosmische Strahlung“ des Netzwerks Teilchenwelt. Das Grobziel der verwendeten Materialien besteht in der Dokumentation des Wissensfortschritts der Teilnehmenden, sie erfüllen jedoch auch verschiedene zusätzliche Zwecke, die an geeigneter Stelle näher erläutert werden. Die didaktischen Grundlagen beim Erstellen der Arbeitsblätter liefern dabei Merrill's First Principles of Instruction (2002). Es existieren jedoch ebenfalls Einflüsse und Gedanken zu den von Meyer (2006) beschriebenen 10 Merkmalen guten Unterrichts, dem von Mietzel (2017) beschriebenen Modell der Verarbeitungstiefe, dem Artikel von Lachmayer, Nerdel und Prestl (2007) in dem das Arbeiten mit Diagrammen strukturiert und erörtert wird, sowie die Abhandlung von Gigl, Kauert und Kauertz (2016), die Aufgabentypen zum Fördern des Problemlösens unter Berufung auf weitere Quellen skizzieren.

Das erste Arbeitsblatt behandelt die Grundlagen der Astroteilchenphysik und besteht insgesamt aus drei Aufgaben. Die erste Aufgabe beinhaltet das Ergänzen der gegebenen Übersicht über die drei grundlegenden Wissenschaften und deren Forschungsgegenstände. Die anderen beiden Aufgaben thematisieren das Standardmodell der Elementarteilchen, indem in Aufgabe 2 Aussagen als „wahr“ oder „falsch“ beurteilt werden müssen, und in der dritten Aufgabe den vier fundamentalen Wechselwirkungen die passenden Beispiele zugeordnet werden. Inhaltlich legen diese Aufgaben die Grundlagen für ein fachlich korrektes Verständnis der kosmischen Strahlung und Myonen. Die erste Aufgabe dient dabei der von Merrill (2002) beschriebenen Aktivierung des Vorwissens (vgl. Merrill (2002), S. 44f.) durch das Anknüpfen an aus der Astronomie bekannte Lerninhalte. Durch wechselnde Aufgabenstellungen wurde versucht eine didaktisch ansprechende Arbeitsatmosphäre zu



erschaffen. Auch zeichnen sich die Aufgaben durch ein steigendes Anforderungsniveau aus. Während in der zweiten Aufgabe lediglich zwischen zwei Auswahlmöglichkeiten entschieden werden muss, bietet die dritte Aufgabe einen größeren Grad an Freiheiten bei der Beantwortung. So kann sie zum Beispiel über das Ausschlussverfahren gelöst werden, indem unlogische Relationen eliminiert werden. Die Lernenden können sich aber auch auf bereits in der Erklärphase angesprochene Inhalte zurückberufen und auf dieser Grundlage die Aufgabe lösen. Das Schaffen verschiedener Schwierigkeitsgrade, welche auf das Leistungsniveau der Schüler\*innen angepasst sind, ist eines der Merkmale des intelligenten Übens (vgl. Meyer (2006), S. 82).

Das zweite Arbeitsblatt thematisiert die kosmische Strahlung, deren Entdeckung sowie deren Zusammensetzung. In beiden Aufgaben werden mögliche Nachweismethoden für diese Art der ionisierenden Teilchenstrahlung angesprochen, da diese den experimentellen Grundstein für die später durch Cosmic@Web vorgestellten Experimente legen. Diese Aufgaben sind beide dem Anforderungsbereich I zuzuordnen, erfordern also das bloße Wiedergeben von bereits gehörten Inhalten. Das Arbeitsblatt erfüllt hauptsächlich den Zweck des Anlegens eines externen Speichers, da man davon ausgehen kann, dass Schüler\*innen die ganzen Informationen, die in vergleichbar kurzer Zeit präsentiert wurden, nicht tief genug verarbeiten können. Um die Informationen zu einem späteren Zeitpunkt wieder aus dem Langzeitgedächtnis abrufen zu können, ist eine tiefe Verarbeitung dieser zwingend notwendig (vgl. Mietzel (2017), S. 325). Folglich dient das Anlegen des externen Speichers dazu, den Lernenden das Zurückgreifen auf diese Informationen zu ermöglichen, auch wenn diese noch nicht tief verarbeitet wurden. Das zweite Arbeitsblatt dient jedoch ebenfalls als Indikator dafür, wie gut die vermittelten fachlichen Inhalte von den Lernenden abgerufen werden können. Das dritte Arbeitsblatt, welches das Arbeiten mit Diagrammen behandelt, gliedert sich in drei Aufgaben: dem schriftlichen Erläutern der Rolle von wissenschaftlichen Diagrammen in Aufgabe 1, dem Ergänzen einer Übersicht in Aufgabe 2 sowie dem Beschreiben der verschiedenen Interpretationsschritte in der dritten Aufgabe. Zur Beantwortung von Aufgabe 1 kann zusätzlich der bereitgestellte Text zur Rolle von Diagrammen in der Wissenschaft genutzt werden (siehe Anhang A.6). Analog zum zweiten Übungsblatt kann ebenfalls der Nutzen des Anlegens des externen Wissensspeichers festgestellt werden, auf den während der Arbeitsphase mit Cosmic@Web zurückgegriffen werden kann.

Die beiden Protokolle entsprechen dem klassischen Aufbau eines physikalischen Protokolls und untergliedern sich in Aufgabenstellung, theoretische Vorüberlegungen, Durchführung und Datenauswertung. Dieser Aufbau wurde gewählt, da die Lernenden über bereits im Physikunterricht angefertigte Protokolle mit diesem vertraut sind und er zudem wissenschaftlicher Standard ist. Die Aufgaben, die das Arbeiten mit Diagrammen thematisieren, folgen dabei dem Ablaufschema des von Lachmayer, Nerdel und Prestl (2007) vorgestellten Modells zum Arbeiten mit Diagrammen. Darüber hinaus verfügen beide Protokolle im Auswertungsteil über Aufgaben, durch deren Bearbeitung das Problemlöseverhalten der Lernenden geschult wird. Dies geschieht zum Beispiel über das Finden eines Erklärungsansatzes für das nicht klassische (sondern relativistische) Verhalten der Myonen am Ende des Protokolls zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer. Zudem erfüllt das Arbeiten mit Diagrammen und die Auswertung dieser auch den Aspekt der Verbesserung des Problemlöseverhaltens durch das Nutzen von Experimenten (vgl. Gigl, Cauet, Kauertz (2016), S. 708).

## **Evaluation und Reflexion**

Nach Entwicklung des ersten Entwurfs der Akzeptanzbefragungen wurde dieser mit der vorher beschriebenen Zielgruppe, also Schüler\*innen der zehnten Klassenstufe, im Dezember 2023 und Januar 2024 umgesetzt. Untersuchungsdaten wurden dabei in Form von Audiodateien gewonnen, welche anschließend transkribiert wurden, aber auch die Schüler\*innenlösungen auf die in den Materialien gestellten Aufgaben, die angefertigten Concept-Maps und die mit Cosmic@Web erstellten Diagramme wurden zur Auswertung genutzt. Eine genauere Darstellung der Erhebungsinstrumente ist in Kapitel 3.4 beschrieben. Das Hauptziel der Teaching Experiments besteht in dem Evaluieren der tatsächlichen Praktikabilität der Materialien, also der Arbeitsblätter und der Protokolle für die Unterrichtseinheit, aber auch in dem Erforschen der in Kapitel 1 genannten Forschungsfragen sowie dem Evaluieren von Cosmic@Web auf dessen Eignung zum Einsatz in der Unterrichtseinheit. Die Pilotstudie wurde in Form von insgesamt zwei jeweils anderthalb bis zweistündigen Sitzungen durchgeführt. Der Autor fungierte dabei als Lehrperson / Interviewer.

Ein weiterer Zweck, welchen die Teaching Experiments erfüllten, ist die Möglichkeit der Einschätzung der zeitlichen Umsetzbarkeit der Inhaltsstruktur in einem sechsständigen Unterrichtskonzept. Die darauf basierenden Überlegungen sind in Kapitel 5 beschrieben. Auch gaben die Teaching Experiments Anlass für das geringfügige Ändern von Aufgabenstellungen, zum Beispiel in Bezug auf die Aufgabenstellung oder beim Erweitern bereits vorhandener bzw. Hinzufügen neuer Aufgaben (siehe Kapitel 3.6 und Kapitel 5). Auf den Grundlagen der durch die Teaching Experiments erprobten Lerninhalte wurden die Unterrichtsmaterialien entwickelt (siehe Anhang A.8, A.9, A.10).

### **3.2 Forschungsfragen**

Obwohl das Arbeiten mit Cosmic@Web der didaktischen Analyse nach Kompetenzen im Bereich der Kommunikation, des Sachwissens und der Erkenntnisgewinnung bedingt und fördert, so findet sich kaum Fach- und Forschungsliteratur für eine Einbindung in den Physikunterricht. Auch das Entwickeln eines zielgerichteten und ressourcennutzenden Problemlöseverhaltens ist eines der Hauptziele des Physikunterrichts und könnte durch das Arbeiten mit Cosmic@Web gefördert werden. Jedoch gibt es in diesem Zusammenhang ebenfalls keine empirisch erprobten Konzepte im Bereich der Astroteilchenphysik.

Um ein Unterrichtskonzept zur Astroteilchenphysik zu entwickeln, welches auf der Nutzung von Cosmic@Web aufbaut, ist jedoch eine systematische Untersuchung in Form einer empirischen Evaluationsstudie nötig. Zu diesem Zweck sind die bereits in der Einleitung angesprochenen Forschungsfragen wie folgt formuliert:

- 1 Welche Kompetenzen werden für das Arbeiten mit Cosmic@Web benötigt?
- 2 Inwieweit können fachliche Inhalte aus der Astroteilchenphysik über Cosmic@Web vermittelt werden?
- 3 Welches Problemlöseverhalten beobachtet man während der Nutzung von Cosmic@Web bei den Lernenden in Relation zu dem erteilten Arbeitsauftrag?

Die erste Forschungsfrage legt dabei das Fundament für einen kompetenzorientierten und kompetenzfördernden Unterricht. Welche von den Bildungsstandards definierten

Kompetenzen durch Cosmic@Web bedingt und gefördert werden, wurde durch die didaktische Analyse (siehe Kapitel 2.2) erforscht. In den daran anschließenden Akzeptanzbefragungen sollen diese Erkenntnisse überprüft werden. Dafür werden die Übungsphasen des Teaching Experiments genutzt, in denen die Teilnehmer\*innen verschiedene Aufgabenstellungen, die das Vorhandensein bestimmter Kompetenzen voraussetzen, bearbeiten.

Ein weiterer zentraler Begriff der didaktischen Forschung ist der durch den Schulunterricht vermittelte Wissensstand. Im Bereich der Naturwissenschaften bildet das fachliche Wissen die Grundlage für das Erreichen und Fördern der Kompetenzen des Erkenntnisgewinns, der Kommunikation und der Bewertung. Im Sinne dieser Überlegung besteht das Ziel der zweiten Forschungsfrage darin, den Umfang und die Vernetztheit der durch die Teaching Experiments vermittelten Lerninhalte zu erfassen. Als Erhebungsinstrument für das Beantworten dieser Forschungsfrage werden Concept-Maps genutzt, welche von den Lernenden vor und nach den Teaching Experiments angefertigt werden. Diese Methode der Wissenserhebung wird in Kapitel 3.4 näher erläutert. Auch die Richtigkeit der Schüler\*innenantworten auf die in den Arbeitsblättern und Protokollen gestellten Aufgaben sind ein möglicher Indikator zum Ergründen dieser Forschungsfrage.

Wie bereits in Kapitel 2.3 dieser Arbeit herausgestellt wurde, betrachten mehrere Autoren\*innen, wie Kück und Carmesin (2017) das Problemlösen und das Verhalten zum zielgerichteten Lösen von physikalischen Problemstellungen als zentralen Handlungspunkt des Physikunterrichts. Folglich wird das Augenmerk dieser Forschung auch auf das beim Arbeiten mit Cosmic@Web hervorgerufene Problemlöseverhalten gelegt. Für das Beantworten der finalen Frage werden die Arbeitsweisen der Lernenden analysiert. Andere Indikatoren, welche in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen, sind die folgenden: die Anwendbarkeit des Verhaltens / der Lösungsstrategie in realen Situationen und das Analysieren alternativer Strategien bzw. das Nutzen alternativer Ressourcen, welche von den Schülern\*innen beim Lösen der Probleme gezeigt werden. Die Beantwortung der genannten Forschungsfragen soll dazu beitragen ein empirisch erprobtes Modell für den Einsatz von Cosmic@Web in einer sechsstündigen Unterrichtseinheit zu entwickeln.

### 3.3 Operationalisierung

Die an dieser Stelle noch allgemein gefassten Forschungsfragen werden in den nachfolgenden Abschnitten dieser Arbeit zunächst operationalisiert. Auch Untersuchungsmöglichkeiten zur Beantwortung dieser Fragen werden in Kapitel 3.4 aufgezeigt. Die erste Forschungsfrage bildet dabei eine Ausnahme, da die Grundlage zu deren Beantwortung bereits durch die didaktische Analyse von Cosmic@Web gelegt wurde. In den Teaching Experiments wird untersucht in welchem Umfang die in Kapitel 2 beschriebenen und erneut im Kapitel 3.1 skizzierten Kompetenzen durch die Lernenden im Rahmen der Teaching Experiments gezeigt werden. Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage, inwieweit fachliche Inhalte über Cosmic@Web vermittelt werden können, erfolgt zunächst die Operationalisierung der abhängigen Variable: die Vermittlung von fachlichen Inhalten. Dabei stehen die folgenden Aspekte im Mittelpunkt:

- 1 Die fachliche Korrektheit des erworbenen Wissens
- 2 Die Menge des erworbenen fachlichen Wissens
- 3 Die Strukturierung dieses Wissens in einem Organisationssystem

Die Wahl der drei eben genannten Operatoren wird über das von Mietzel (2017) beschriebene Modell des Langzeitgedächtnisses begründet. Entscheidend für die Qualität des Vermittelns fachlicher Inhalte ist, dass die Lernenden diese in ihrem Langzeitgedächtnis in hoch organisierten Netzwerken, wie zum Beispiel in propositionalen oder semantischen Netzwerken, speichern. Mietzel (2017) beschreibt, dass vor allem das in der Schule erlangte Wissen im semantischen Gedächtnis gespeichert wird (vgl. Mietzel (2017), S. 290). Geschieht dies nicht, so werden die vermittelten und von den Teilnehmenden aufgenommenen Inhalte entweder im sensorischen Register oder im Kurzzeitgedächtnis nach ca. 30 Sekunden wieder verworfen, sie sind nicht gespeichert und nicht mehr abrufbar (vgl. Mietzel (2017), S. 286). Damit dies geschieht müssen die aufgenommenen Informationen durch die von Baddeley (2002) zentrale Exekutive als relevant beurteilt werden (vgl. Mietzel (2017), S. 290). Des Weiteren beschreibt Mietzel (2017) Wissen als eine im Gedächtnis repräsentierte und in geeigneten Netzwerkformen organisierte Information (vgl. Mietzel (2017), S. 301f.). Mit der Wahl eines geeigneten Erhebungsinstruments wird dementsprechend versucht, die Form des von den Lernenden gewählten Organisationssystems zu erfassen. Da gelehrte fachliche Inhalte regelmäßig durch Leistungserhebungen auf die in den Bildungsstandards definierte Weise

überprüft und bewertet werden, ergibt sich als logische Schlussfolgerung zudem, dass die durch Cosmic@Web vermittelten fachlichen Inhalte über eine hohe Korrektheit verfügen müssen. Diese Merkmale gilt es mit geeigneten Erhebungsinstrumenten beobachtbar und messbar zu machen. Diese Instrumente werden in Kapitel 3.4 beschrieben.

Bei Betrachtung der dritten Forschungsfrage, welche das von den Lernenden gezeigte Problemlöseverhalten thematisiert, können die folgenden Variablen des eben benannten Verhaltens operationalisiert werden.

- 1 Menge (und Sinnhaftigkeit) der von den Lernenden genutzten Ressourcen zur Beantwortung der Aufgaben
- 2 Anwendbarkeit des Verhaltens auf andere Problemsituationen

Diese zwei genannten Operatoren orientieren sich dabei an den im Kapitel 2.3.1 beschriebenen Kriterien des Problemlöseverhaltens. Ein weiterer Ansatz, welcher zum Beantworten der Forschungsfrage genutzt werden kann, besteht in dem Analysieren des Problemlöseverhaltens der Lernenden in Bezug auf das von Tallman et al. (1993) beschriebene Vier-Phasen-Modell des Problemlöseverhaltens. Dafür wird das beim Umgang mit Cosmic@Web gezeigte Problemlöseverhalten von der Lehrperson dokumentiert und anschließend in die vier Phasen eingeordnet.

Selbstverständlich lässt sich die Eignung zum Vermitteln fachlicher Inhalte sowie das Problemlöseverhalten nicht vollends in diesen Operatoren ausdrücken. Weitere Komponenten, welche beispielsweise für das Erfassen des Wissens von Bedeutung sind, wären die Behaltensdauer oder auch der Transfer des Wissens auf andere Situationen bzw. Aufgaben. Es wurde sich jedoch aus Ermessensgründen und aus Gründen der Durchführbarkeit der Akzeptanzbefragungen dazu entschieden, die hier aufgeführten Operatoren zu priorisieren.

Für die Untersuchung der aufgeführten Operatoren werden verschiedene Erhebungsmethoden zu Rate gezogen, die in Kapitel 3.4 erklärt werden. Dies beinhaltet den transkribierten Wortlaut der Lernenden während des Teaching Experiments, Anmerkungen / Beobachtungen des Interviewers während der Akzeptanzbefragungen (siehe Anhang A.2), um

vor allem das Verhalten der Lernenden beim Umgang mit Cosmic@Web zu erfassen, aber auch die von den Teilnehmenden ausgefüllten Arbeitsblätter (siehe Teaching Experiments – Anhang) sowie die Concept-Maps (siehe Anhang A.7), welche von den Lernenden erstellt werden.

### 3.4 Untersuchungsdurchführung und Erhebungsinstrumente

Nachdem das Studiendesign der Teaching Experiments sowie die zugrunde liegenden Forschungsfragen und die Möglichkeiten zu deren Beantwortung skizziert wurden, soll nun der genaue Ablauf der Akzeptanzbefragungen im Detail beschrieben werden. In diesem Zusammenhang werden ebenfalls die grundlegenden Gedanken, die Erhebungsmethoden und -instrumente beschrieben.

#### Struktur der Akzeptanzbefragungen

Den didaktischen Vorüberlegungen aus dem zweiten Kapitel folgend, lassen sich die Akzeptanzbefragungen folgendermaßen untergliedern. Insgesamt besteht das Teaching Experiment aus fünf thematischen Einheiten, die in insgesamt zwei Sitzungen, welche jeweils anderthalb bis zwei Stunden dauern, behandelt werden. Die ersten drei der fünf Einheiten, welche jeweils einen Themenblock beinhalten, werden in der ersten Sitzung behandelt, die anderen beiden in der zweiten und abschließenden Sitzung. Die Grobstruktur der Teaching Experiments ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

1.Sitzung			2. Sitzung	
1. Thematische Einheit	2. Thematische Einheit	3. Thematische Einheit	4. Thematische Einheit	5. Thematische Einheit
Einführung in die Astroteilchenphysik	Kosmische Strahlung und Myonen	Wiederholung zum Arbeiten mit Diagrammen	Einführung Cosmic@Web CosMO-Mühle Ankunftsrichtung von Myonen	LiDO-Experiment Mittlere Lebensdauer von Myonen

*Tabelle 4: Grobstruktur der Teaching Experiments.*

Dabei folgen die ersten beiden Einheiten dem typischen Ablauf eines Teaching Experiments, sie bestehen also aus einer Erklärphase, dem Erfragen der Akzeptanz, dem Paraphrasieren der

Lerninhalte durch die Teilnehmer\*innen und einer abschließenden Übungsphase. Das Ziel der ersten Sitzung bestand in dem Vermitteln der fachlichen Grundlagen der Astroteilchenphysik, die für das Arbeiten mit Cosmic@Web benötigt werden, und einer Wiederholung des Arbeitens mit Diagrammen.

Inhaltlich ist die erste thematische Einheit, welche die Grundlagen der Astroteilchenphysik beschreibt, wie folgt strukturiert. Zu Beginn der Erklärphase werden vier große physikalische Fragen formuliert, welche das Interesse der Lernenden wecken sollen, woraufhin die Astroteilchenphysik als neue und moderne Wissenschaftsdisziplin vorgestellt wird, die sich mit der Beantwortung dieser vier Fragen befasst. Im Anschluss an diesen Einstieg geht die Lehrperson auf die zugrundeliegenden Wissenschaften Astronomie, Kosmologie und Teilchenphysik sowie deren Untersuchungsgegenstände und bekannte Entdeckungen ein. Insbesondere das Standardmodell der Elementarteilchen wird in seinen Grundzügen erläutert, da die Vorstellung der Myonen und der fundamentalen Wechselwirkungen die nachfolgenden Themen maßgeblich prägen. Am Ende der Erklärung durch die Lehrperson erfolgt das Rückbesinnen auf die Astroteilchenphysik und deren grundlegendem fachlichen Ansatz zur Beschreibung physikalischer Phänomene. Auch der Begriff der kosmischen Strahlung fällt in diesem Zusammenhang das erste Mal.

Wie bereits beschrieben folgt auf die Erklärphase die Erfragung der Akzeptanz der fachlichen Inhalte. Das heißt, nach den Erklärungen durch die Lehrkraft schlossen sich jeweils Fragen über die Akzeptanz an. Beispiele für solche Fragestellungen könnten lauten: „Fandest du die Erklärung der Naturwissenschaftler\*innen logisch?“, „Findest du Aspekte bei dieser Erklärung unverständlich oder unlogisch?“ Dabei wird beachtet, dass alle Schüler\*innen die Möglichkeit und genügend Zeit haben, um diese Frage zu beantworten. Anschließend erhielten die Teilnehmer\*innen die Aufforderung den gerade behandelten Themenabschnitt zu paraphrasieren, also zum Beispiel: „Bitte beschreibe mit eigenen Worten die Grundkonzepte der Astroteilchenphysik.“ Hier ist ebenfalls wichtig, dass alle Lernenden die Möglichkeit haben sich zu äußern beziehungsweise Aussagen des\*r jeweils anderen zu ergänzen. Die Lehrperson nimmt dabei eine zurückhaltende Zuhörerrolle ein, um keine Antworten vorwegzunehmen, was die Untersuchungsergebnisse verfälschen könnte.



Den Abschluss dieser ersten Einheit bildet das Bearbeiten der Übungsaufgaben des ersten Arbeitsblattes „Grundlagen der Astroteilchenphysik“. Die Reihenfolge der Aufgaben gleicht dabei der Struktur der Erklärphase. Während Aufgabe 1 zum Anlegen eines externen Wissensspeichers dient, auf den in der zweiten Sitzung gegebenenfalls zurückgegriffen werden kann, liegt das Augenmerk der beiden anderen Aufgaben auf den fachlichen Grundlagen des Standardmodells der Elementarteilchen. Dies liegt daran, dass das Verständnis dieses Modells eine fundamentale Grundlage für die kommenden Themenkomplexe bildet, vor allem die Vorstellung der Myonen und der Entstehung der sekundären kosmischen Strahlung durch Umwandlung der Primärteilchen. Die erste Aufgabe wurde dabei in Einzelarbeit gelöst, im Anschluss erfolgt ein mündlicher Vergleich. Die Sozialform der Einzelarbeit wurde deshalb gewählt, um einen weiteren Indikator für das Beantworten der zweiten Forschungsfrage zu kreieren. Dagegen wurde die zweite Frage durch mündliches Abfragen gelöst, bei dem beide Lernenden ihren Lösungsvorschlag verbalisierten bevor die Lehrkraft deren Richtigkeit bestätigte bzw. diese Lösung korrigierte. Dies geschah, um eventuelle Fehlvorstellungen zu erfassen und diese instantan zu überwinden. Die dritte Aufgabe wurde analog zur ersten gelöst. Wieder erfolgt der Vergleich der Ergebnisse mündlich. Auch wurde sich bewusst dazu entschieden unterschiedliche Aufgabentypen und Sozialformen zu nutzen.

Der zweite Themenkomplex folgt ebenfalls dem klassischen Ablauf einer Akzeptanzbefragung. Die Erklärphase thematisiert auf inhaltlicher Ebene die kosmische Strahlung, deren Entdeckung durch Victor Hess, die Unterteilung in primäre und sekundäre Strahlung, die Entstehung von Teilenschauern, aber auch die Nachweismöglichkeiten, was Nebelkammern, Szintillatoren und die Grundlagen des Tscherenkow-Effekts inkludiert. Analog zur ersten thematischen Einheit erfolgt auch hier im Anschluss die Erfragung der Akzeptanz durch die Lernenden sowie die Aufforderung zur Paraphrase („Beschreibe bitte mit eigenen Worten, was die Physiker\*innen über die kosmische Strahlung herausgefunden haben.“). Das Verhalten der Lehrperson gleicht den Ausführungen aus der ersten Einheit. Die Übungsphase, welche den Abschluss der zweiten thematischen Einheit bildet, inkludiert das Bearbeiten der beiden Aufgaben des zweiten Übungsblattes. Beide Aufgaben wurden in Einzelarbeit gelöst, ein Vergleich der Lösungen erfolgte nach dem Bearbeiten der jeweiligen Aufgabe. Auch hier wurde diese Sozialform gewählt, um den Wissensstand der einzelnen Schüler\*innen zu

erfassen. Die Richtigkeit der Schüler\*innenlösung kann ebenfalls als Indiz für den jeweiligen Kenntnisstand angesehen werden. Sollten sich also schon in diesem Zusammenhang größere Lücken auftun, so müssten diese vor dem Behandeln der neuen Themenabschnitte geschlossen werden.

Den Abschluss der ersten Sitzung bildet dann die dritte Einheit, welche das Arbeiten mit Diagrammen wiederholt. An dieser Stelle wurde auf die klassische Vorgehensweise des Teaching Experiments verzichtet, da sowohl im Fach Mathematik als auch im Physikunterricht Berührungspunkte für das Arbeiten mit Diagrammen existieren. (vgl. SMK (2021), S. 14, S. 18f., S. 29) Dementsprechend wurde angenommen, dass die Lernenden bereits über einen grundsätzlichen Wissensvorrat verfügen, dieser sollte zur Sicherheit aber noch einmal aufgefrischt werden. Dementsprechend wurden sogleich drei Übungsaufgaben des dritten Arbeitsblatts „Wiederholung: Arbeiten mit Diagrammen“ in Einzelarbeit durchgeführt und anschließend gemeinsam verglichen. Im Vordergrund dieser Einheit stehen die Rolle von Diagrammen in der Wissenschaft, die verschiedenen Diagrammtypen als auch die wesentlichen Schritte beim Auswerten von Diagrammen. Das Zusammenwirken dieser drei Einheiten legt die Grundlage für die zweite Sitzung, in welcher das Arbeiten mit Cosmic@Web im Vordergrund steht.

Die Aufgaben 2 und 3 des Arbeitsblatts „Wiederholung: Arbeiten mit Diagrammen“ dienen dazu, einerseits die wichtigsten und im weiteren Verlauf relevanten Diagrammtypen vorzustellen und andererseits die wesentlichen Schritte beim Interpretieren von Diagrammen aufzuzeigen. Sie legen also die Grundlage für das Arbeiten mit Cosmic@Web. Das Kreisdiagramm wurde dabei in die zweite Aufgabe integriert, um die Rolle von Diagrammen beim Auswerten von Statistiken zu betonen. Für das Arbeiten mit Cosmic@Web hat dieser Diagrammtyp keine Bedeutung. Eine besondere Rolle kommt der ersten Aufgabe zu. Diese soll dazu dienen, die Rolle von Diagrammen in der Wissenschaft als nützliches Werkzeug zu erläutern, um die Bedeutung von Cosmic@Web als Tool zur Diagrammerstellung zu steigern. Dementsprechend wurde an dieser Stelle Wert daraufgelegt, die Rolle von Diagrammen als wissenschaftliches Hilfsmittel zum Untersuchen und Evaluieren physikalischer Theorien aufzuzeigen.

Im Zentrum der zweiten Sitzung, welche aus zwei thematischen Einheiten aufgebaut ist, steht das Untersuchen der Eigenschaften der kosmischen Strahlung mit Cosmic@Web. Ein Themenschwerpunkt umfasst dabei jeweils das Bearbeiten eines Protokolls. Das heißt der erste Schwerpunkt umfasst die Ankunftsrichtung der Myonen und der zweite die mittlere Lebensdauer der Myonen. Inhaltlich schließt das Bearbeiten der zwei Protokolle an die Erläuterungen der kosmischen Strahlung sowie deren Nachweismöglichkeiten in bekannten Experimenten aus der ersten Sitzung an. Der thematische Schwerpunkt wird in diesen Einheiten vor allem auf das Arbeiten mit Cosmic@Web gelegt. Die Lernenden erschließen nach einer kurzen Einführung (durch das Erklärvideo und dem Tutorial zur Diagrammerstellung) die zahlreichen Funktionen des Online-Tools durch das Beantworten der Arbeitsaufgaben. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass das Ziel dieser beiden Einheiten nicht darin bestand den Schülern\*innen die gesamte grundlegende Astroteilchenphysik zu vermitteln. Es sollten vielmehr die für das Arbeiten mit Cosmic@Web erforderlichen Kompetenzen sowie das Problemlöseverhalten der Lernenden beim Umgang mit Cosmic@Web beobachtet werden.

Die in der zweiten Sitzung behandelten Themenblöcke folgen nicht dem klassischen Ablauf einer Akzeptanzbefragung. Auf Basis der in der ersten Sitzung gelegten Grundlagen wird nun Cosmic@Web als Werkzeug des selbstständigen Erarbeitens genutzt. Folglich ist die Menge, der durch die Lehrperson gegebenen Erklärungen relativ gering und die Erklärphase wäre dementsprechend kurz.

Der insgesamt vierte Themenblock beginnt mit dem Vorstellen von Cosmic@Web als Online Tool, welches für die Beantwortung astroteilchenphysikalischer Forschungsfragen genutzt werden kann. Im Anschluss schauen sich die Teilnehmer\*innen ein Einführungsvideo an und erläutern nach dem Schauen eventuelle Verständnisschwierigkeiten bzw. Unklarheiten. Danach bearbeiten die Lernenden selbstständig das Tutorial von Cosmic@Web, d.h. sie arbeiten sich zunächst alleine und selbstständig in die Diagrammerstellungsfunktionen ein. Von der Lehrperson erhalten die Schüler\*innen lediglich den Hinweis sich gegebenenfalls Notizen zu machen, falls ihnen Punkte im Tutorial / Video wichtig erscheinen. Ansonsten nimmt die Lehrkraft, wie auch schon in den Übungsphasen der ersten Sitzung, eine stille und zurückhaltende Beobachterrolle ein und wird nur durch die explizite Aufforderung der

Lernenden aktiv, zum Beispiel für das Beantworten einer Frage. Im Anschluss an das Tutorial erfolgt die Rückfrage seitens der Lehrperson, ob Probleme entstanden sind. Falls ja, so werden diese sofort geklärt. Im Anschluss kann mit dem Bearbeiten des ersten Protokolls „Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen“ begonnen werden.

Die Aufgaben im Bereich der theoretischen Vorüberlegungen dienen allgemein dazu das Wissen der vorherigen Sitzung zu wiederholen, also die bereits vermittelten Lerninhalte für die Schüler\*innen wieder greifbar zu machen. Danach erfolgt ein schrittweises Erstellen der Diagramme zur Untersuchung der Ankunftsrichtung von Myonen. Beim Formulieren der Arbeitsaufgabe wurde darauf geachtet, dass der zu verwendende Diagrammtyp, das xy-Diagramm, lediglich umschrieben, namentlich aber nicht genannt wird. Die Teilnehmer\*innen müssen folglich auf ihr Wissen zu verschiedenen Diagrammtypen zurückgreifen und sich für die beste Methode zur Veranschaulichung des Sachverhalts entscheiden.

Der Einstieg über das xy-Diagramm wurde bewusst gewählt, da dieser Diagrammtyp den Lernenden am vertrautesten sein sollte, es finden sich durch den Mathe- und Physikunterricht unzählige Beispiele für solche Diagramme, wie Funktionsgraphen in einem kartesischen Koordinatensystem,  $s(t)$ - oder  $I(U)$ -Diagramme. Danach wird der Diagrammtyp verändert, da der Einfluss einer weiteren physikalischen Größe, der Temperatur, untersucht werden soll. Nach dem Erstellen des Diagramms erfolgt stets die Auswertung / Interpretation, um den Bezug zum fachlichen Hintergrund der Astroteilchenphysik und zur physikalischen Fragestellung zu betonen. Das Auswerten der Diagramme soll nicht bloß als Selbstzweck erscheinen, sondern es soll den Lernenden aufgezeigt werden, dass Cosmic@Web ein digitales Werkzeug zum Beantworten wissenschaftlicher Fragestellungen ist. Am Schluss der Datenauswertung erfolgt die Formulierung einer Schlussfolgerung, hier sollen die zentralen Aussagen des Experiments zusammengefasst werden. Den Abschluss bildet dann eine weiterführende Aufgabe zu den Quellen kosmischer Strahlung.

Während des Erstellens der Diagramme und dem Beantworten der Protokollaufgaben erfüllt die Lehrperson stets die Rolle des stillen Beobachters und wird nur durch Aufforderungen seitens der Lernenden aktiv. Tipps oder explizite Erklärungen werden nur bei Unverständnis der Aufgaben gegeben bzw. beim Vergleichen der Lösungen. Die einzigen Ausnahmen, bei

denen sich die Lehrperson in der Arbeitsphase von selbst äußert, betreffen Probleme, deren Nichtbewältigung große Zeitverluste zur Folge hätten, zum Beispiel bei wiederholten Schwierigkeiten / Fehlern bei der Diagrammerstellung, oder Probleme, die die Jugendlichen nicht alleine lösen können, beispielsweise Probleme technischer Art. Die Lehrperson erteilt für das Arbeiten mit Cosmic@Web einen Hinweis zu Beginn. Die Lernenden sollen für das Arbeiten mit Cosmic@Web immer zwei Internettabs verwenden, damit einer für den Diagrammerstellungsmodus und der andere für die Recherche genutzt werden kann. Das Hauptaugenmerk liegt vor allem auf dem Erfassen des selbstständigen Verhaltens der Teilnehmenden beim Lösen der Aufgaben oder gegebenenfalls bei der Beseitigung von Problemen und Fehlern, die den Schülern\*innen selbst auffallen.

Die Lernenden bearbeiten dabei die Aufgaben in Einzelarbeit, ein mündlicher Vergleich erfolgt nach dem Bearbeiten der jeweiligen Aufgabe. Auch an dieser Stelle wurde die Sozialform gewählt, um eventuelle Schwierigkeiten / Verständnisprobleme der Lernenden aufzudecken, die sonst bei einer Partnerarbeit möglicherweise verborgen geblieben wären. Der\*die Partner\*in könnte eine fehlerhafte Vorstellung oder Erklärung unterbinden bevor diese in ihrem vollen Ausmaß verbalisiert werden würde. Da dies bei einer Einzelarbeit nicht möglich ist und der\*die Lernende beim mündlichen Vergleich seinen kompletten Gedankengang darlegen kann, ist das Erfassen und die Analyse möglicher Hindernisse besser möglich. An dieser Stelle muss noch angemerkt werden, dass die Jugendlichen zwar nicht in Partnerarbeit die Protokollaufgaben lösten, jedoch ist die Wahl des\*r besitzenden Schülers\*in freiwillig. Aufgrund der Vertrautheit der beiden Lernenden sollten also weniger kommunikative Schranken existieren, indem es den Schülern\*innen nicht peinlich ist eine falsche Lösung vorzutragen. All dies geschah im Sinne einer enthemmten Kommunikation. Beim mündlichen Vergleich wird darauf geachtet, dass die Gedankenprozesse beim Erstellen der Diagramme, also bei der Wahl des Diagrammtyps und der verwendeten physikalischen Größen, klar und möglichst genau an die Lehrperson kommuniziert werden. Auch inhaltliche Intentionen und Überlegungen sollen von den Lernenden kommuniziert werden, damit diese im Anschluss besser analysiert werden können.

Die fünfte und letzte thematische Einheit, in deren Zentrum das Bearbeiten des Protokolls „Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen“ steht, gleicht dem Konzept des vierten

Themenblocks. Auch hier erfolgt zunächst das Lösen von Einstiegsaufgaben. Diese erfüllen jedoch nicht den Zweck der Wissenswiederholung, sondern der Einarbeitung in die neuen Konzepte. Beispielsweise stehen der bis dahin nur oberflächlich erwähnte Prozess der Myonenumwandlung oder die physikalische Größe der mittleren Lebensdauer im Vordergrund. Die beiden anderen Aufgaben zur Vorbereitung dienen einerseits dazu, den Lernenden den Begriff einer Fit-Funktion zu veranschaulichen, da diese essentiell für die quantitative Auswertung der Versuchsdaten ist, andererseits den Bezug zum Mathematikunterricht und der Exponentialfunktion herzustellen. Der Internetlink (siehe „Hilfestellung“) führt zu einer Simulation, in der der Einfluss der verschiedenen Parameter auf den Funktionsgraphen beobachtet werden kann, was ebenfalls von großer Bedeutung für das Erstellen der Fitfunktion im weiteren Versuchsteil ist.

Ähnlich zur vorherigen thematischen Einheit wird in der Durchführungsbeschreibung der zu verwendende Diagrammtyp (1D-Histogramm) umschrieben. Nach dem Erstellen des Diagramms über den angegebenen Datensatz erfolgt der Schritt der Interpretation, also der qualitativen Beschreibung der Verteilung der Messdaten. Im weiteren Verlauf wird analog zur Aufgabe 2 eine Fit-Funktion erstellt. Die zu verwendenden Messpunkte müssen dabei aus dem Diagramm abgelesen / geschätzt werden, dies wird anhand eines Beispiels durch die Lehrperson erläutert. Nach dem Erstellen der Fit-Funktion erfolgt das rechnerische Ermitteln der mittleren Lebensdauer des Myons. Im Bereich der Nachbereitung erfolgt über das Ausrechnen der Myonengeschwindigkeit und der mittleren Lebensdauer das Ermitteln der durchschnittlichen Flugstrecke eines Myons. Der dadurch entstehende kognitive Konflikt, da sich das Verhalten eines Myons nur über die Relativitätstheorie beschreiben lässt, bildet den Abschluss des Protokolls. Im Sinne der Nature of Science könnte an diesen Punkt angeknüpft werden, indem man in der Sekundarstufe II die Aussagen der Relativitätstheorie behandelt.

Die gewählte Sozialform sowie der anschließende mündliche Vergleich nach jeder Aufgabe wurden ebenfalls analog zur vierten Einheit gestaltet. Auch das Verhalten der Lehrperson in dieser Einheit ist das gleiche wie zuvor, da dieselben Parameter untersucht werden sollen, auf deren Grundlage die Forschungsfragen ausgewertet werden können.

Den Rahmen der Akzeptanzbefragungen bilden dabei das Erstellen der zwei Concept-Maps, welche zu Beginn der ersten Sitzung und am Ende der zweiten Sitzung erstellt werden. Der Vergleich der beiden Organisationssysteme kann im Anschluss genutzt werden, um den Wissenserwerb der Teilnehmer\*innen zu evaluieren.

## **Erhebungsinstrumente**

Nachdem die inhaltliche und gedankliche Struktur der Teaching Experiments beschrieben wurde, wird in den folgenden Absätzen auf die gewählten Erhebungsinstrumente eingegangen. Dazu zählen: die Transkription Ton-Aufzeichnung durch ein Diktiergerät (siehe Teaching Experiments – Anhang), die Arbeitsmaterialien (siehe Anhang A.4), die Anmerkungen des Autors zum Problemlöseverhalten der Lernenden (siehe Anhang A.2), die von den Teilnehmenden erstellten Diagramme (siehe Teaching Experiments – Anhang) und die Concept-Maps (siehe Anhang A.7).

Der Wortlaut der Teaching Experiments wurde durch ein Diktiergerät aufgenommen und anschließend transkribiert. Das Transkript bildet die Grundlage für die im Kapitel 4 folgende qualitative Analyse und Auswertung der im Kapitel 3.3 operationalisierten Parameter. Die Arbeitsmaterialien (Arbeitsblätter samt Musterlösungen) wurden durch den Autor eigens für die Teaching Experiments erstellt und erfüllen verschiedene Funktionen. Auf der einen Seite spiegeln diese die inhaltliche Struktur der Teaching Experiments wider und bilden den groben fachlichen Rahmen für den Leitfaden der späteren Unterrichtseinheit. Auf der anderen Seite dienen sie als Erhebungsinstrument für die drei Forschungsfragen. Dementsprechend dienen die Aufgaben der Arbeitsblätter und Protokolle als Indiz für das Verständnis der in den Akzeptanzbefragungen vermittelten Lerninhalte zur Astroteilchenphysik. Auch sind die Aufgaben an den entsprechenden Stellen allgemeiner formuliert, sodass unterschiedliche Antwortmöglichkeiten existieren. Beispiele dafür wären die zweite Aufgabe des zweiten Arbeitsblattes bei dem die Lernenden eine von zwei Nachweismöglichkeiten der kosmischen Strahlung erläutern sollen oder die abschließende Aufgabe des ersten Protokolls in der eine Übersicht über die verschiedenen Quellen der kosmischen Strahlung erstellt werden muss. Auch die Umschreibung des Diagrammtyps in den Protokollen, sodass die Schüler\*innen zum

Nachdenken über die Sinnhaftigkeit und Anwendungsgebiete der einzelnen Diagrammtypen angeregt werden, ist ein Beispiel für eine bewusst allgemein formulierte Aufgabenstellung.

Darüber hinaus werden das Problemlöseverhalten und die für das Arbeiten mit Cosmic@Web erforderlichen Lösungsstrategien vor allem beim Bearbeiten der speziell entwickelten und vorher festgelegten Aufgaben durch die Lernenden beobachtbar. Dazu werden insbesondere Aufgabenstellungen im Bereich der Diagrammerstellung und der Datenauswertung der beiden Protokolle herangezogen, die sich zum Analysieren des von den Lernenden gezeigten Problemlöseverhaltens eignen. Die Durchführungsbeschreibung ist in diesem Kontext bewusst allgemein formuliert, sodass die Lernenden selbst auf den geeigneten Diagrammtyp schließen müssen. Dies stellt die erste Barriere dar, welche es zu überwinden gilt. Die folgenden Probleme beziehen sich auf den Auswertungsprozess, d.h. das Interpretieren der Diagramme bzw. das Bearbeiten der Folgeaufgaben. Die Aufgabenstellung lautet stets: Interpretiere das Diagramm. Die Lösungsstrategien zum Bewältigen dieser Aufgaben gestalten sich also vielfältig und die Lernenden müssen verschiedene Handlungsweisen erst gegeneinander abwägen und schließlich eine dieser durchführen.

Ein zweiter Ansatzpunkt zum Beschreiben des Problemlöseverhaltens in Bezug auf den Arbeitsauftrag besteht im Kreieren unterschiedlicher Auswertungsstrategien. Das Protokoll zur Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen fokussiert sich dabei auf eine qualitative Auswertung, an deren Ende das Formulieren von Schlussfolgerungen, welche die Experimentiererergebnisse zusammenfassen, steht. Das Protokoll zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer verfolgt stattdessen eine quantitative Auswertung, in deren Zusammenhang mehrere mathematische Verfahren, d.h. das Bilden einer Fit-Funktion mit dem Taschenrechner sowie mehreren Berechnungen, durchgeführt werden. Dadurch können noch einmal unterschiedliche Dimensionen des mit Cosmic@Web verbundenen Problemlöseverhaltens analysiert werden: einmal die Dimension beim Umgang mit Diagrammen und einmal die Dimension auf den Rückbezug auf vorher vermittelte fachliche Inhalte zur Erklärung des Diagramminhalts.

Während des Bearbeitens dieser Aufgaben wird das Verhalten der Schüler\*innen von der Lehrperson beobachtet und dokumentiert. Über diese Notizen kann abgeschätzt werden,



inwieweit die vorher beschriebenen Operatoren des Problemlöseverhaltens erfüllt wurden. Es kann jedoch ebenfalls eine Einordnung des gezeigten Problemlöseverhaltens in das Vier-Phasen-Modell von Tallman et al. (1993) erfolgen.

Die Concept-Maps zum Thema „Astroteilchenphysik“ stellen ein weiteres Erhebungsinstrument dar, welches vor allem zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage dient. Diese werden am Anfang der ersten Sitzung und am Ende der zweiten Sitzung erstellt und sollen am Anfang das Vorwissen der Teilnehmer\*innen und den am Ende der Akzeptanzbefragungen vorliegenden Wissenstand erfassen. Anhand der Concept-Maps können alle drei Operatoren, die zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage beschrieben wurden, analysiert werden. Die Menge des Wissens wird anhand der Anzahl der in den Concept-Maps enthaltenen Begriffe / Begriffsgruppen ausgedrückt. Die Strukturiertheit kann über die Anzahl der Relationspfeile beschrieben werden. Des Weiteren kann die fachliche Korrektheit der Begriffe und der Begriffsgruppen anhand des gegebenen Kontextes der Astroteilchenphysik eingeschätzt und bewertet werden.

### **3.5 Bedingungsanalyse**

#### **Untersuchte Gruppe**

An den Teaching Experiments nahmen insgesamt sieben Schüler\*innen in vollem Umfang teil. Sämtliche Teilnehmer und Teilnehmerinnen besuchten die zehnte Klassenstufe eines allgemeinbildenden Gymnasiums und waren 15 bis 16 Jahre alt. Die Teilnahme an den Teaching Experiments war freiwillig. Zum Anwerben der Schüler\*innen wurden keine externen Anreize eingesetzt. Im Vorfeld wurden insgesamt zwei kurze Werbeveranstaltungen in den beiden Parallelklassen während des Physikunterrichts durchgeführt, welche das Versuchsvorhaben, das zugrundeliegende Thema und die Anwendungsmöglichkeiten von Cosmic@Web grob skizzierten.

Sowohl nach eigener Aussage als auch nach Auskunft der Physiklehrkraft des Gymnasiums hatten die Lernenden keine bis wenige nennenswerte Vorkenntnisse im Themenfeld der Astroteilchenphysik. Ein dafür möglicher Grund ist sicherlich das Fehlen von astroteilchenphysikalischen Lerninhalten im sächsischen Lehrplan des Fachs Physik (vgl. SMK

(2022)). Dies bildete eine essentielle Voraussetzung für die Akzeptanzbefragungen, da unter anderem erforscht werden sollte, inwieweit die Vermittlung grundlegender fachlicher Inhalte über Cosmic@Web von den Lernenden akzeptiert und verstanden wird.

Die Lehrkraft, welche beide Klassen im Fach Physik betreut, teilte mir zudem mit, dass die Leistungsniveaus der Lernenden starke Differenzen aufweisen. Die Lehrperson führte als möglichen Grund für diese starke Heterogenität der Leistungsspektren die Corona-Pandemie und das damit einhergehende Homeschooling auf. Die Lernenden hatten in der 6. bzw. 7. Klassenstufe reinen Online-Unterricht. Oftmals litt der Physikunterricht aber auch unter durch die Lehrkraft krankheitsbedingte Unterrichtsausfällen. In dieser Zeit, in der die Jugendlichen zu Hause oftmals selbstständig und nur mit geringen Hilfestellungen den Unterrichtsstoff erarbeiten mussten, ist laut Kai Maaz (DIPF) das soziale Umfeld und der familiäre Hintergrund von immenser Bedeutung (vgl. Süddeutsche Zeitung (2021)) Folglich kann man davon ausgehen, dass das physikalische Vorwissen der Schüler\*innen nicht dem sonst üblichen Leistungsstand anderer Jahrgänge zehnter Klassen im Gymnasium entspricht.

Ein weiterer Punkt, der betrachtet werden muss, ist die Vorselektierung der zur Teilnahme gewillten Schüler\*innen. Diese Handlung verfolgte das Ziel der Steigerung der Aussagekraft der Teaching Experiments trotz der geringen Anzahl an teilnehmenden Schülern\*innen. Für das Erreichen des Ziels wurde sich dazu entschieden, einen möglichst großen Querschnitt aus dem Leistungsspektrum der Lernenden zu befragen. Dafür wurden zunächst alle Schüler\*innen, welche an den Akzeptanzbefragungen teilnehmen wollten, die folgenden drei Fragen gestellt.

- 1 Hast du über den Schulunterricht hinaus Interesse an der Physik?
- 2 Wie schätzt du deine Leistungen im Physikunterricht ein?
- 3 Hast du vor, in der elften Klassenstufe Physik weiter zu belegen?  
Falls ja, hast du vor den Grund- oder Leistungskurs zu wählen?

Aus dem Pool an Interessenten wurden dann insgesamt sieben Schüler\*innen ausgewählt, die ein breites Spektrum sowohl an Motivation als auch an fachlichen Kenntnissen zeigen. In der folgenden Tabelle sind die Antworten der sieben Versuchsteilnehmer\*innen dargestellt.

Nummer der Teilnehmenden	Antwort auf Frage 1	Antwort auf Frage 2	Antwort auf Frage 3
Schüler/in 1 (S1)	Ich verfolge die Nobelpreisverleihung in den Medien. Darüber hinaus aber eher nicht.	Meine Noten sind immer so im Bereich 2. Es ist aber auch stark vom Thema abhängig.	Ich habe vor den Grundkurs zu besuchen.
Schüler/in 2 (S2)	Ich habe schon Interesse, aber eher an Astronomie, jetzt nicht so an Stromkreisen oder Optik.	Ich habe in Physik einen Notendurchschnitt von 1,8. Bin also ganz gut, denke ich.	Ich wähle im der 11. Klasse den Grundkurs.
Schüler/in 3 (S3)	Astronomie und das Universum, sowas interessiert mich schon. Aber Optik mag ich nicht.	Nicht so gut. Der Schulstoff ist auch nicht so interessant.	Ich wähle Physik ab.
Schüler/in 4 (S4)	Eigentlich nicht. Zumindest habe ich kein großes Interesse.	Eigentlich ganz gut. Meine Noten sind so im Bereich 1 bis 2. Ich glaub auf meinem Halbjahreszeugnis kriege ich sogar die 1.	Ich denke, dass ich den Grundkurs wählen werde.
Schüler/in 5 (S5)	Ja, ein sehr großes Interesse. Ich schaue mir auch regelmäßig Physik-Videos auf YouTube an.	Meine Leistungen sind sehr gut. Ich habe nur 1, vielleicht mal eine 2.	Ich wähle nächstes Jahr den Physik-LK.
Schüler/in 6 (S6)	Nein.	Schlecht. Ich habe eine 4 in Physik.	Ich will Physik abwählen.
Schüler/in 7 (S7)	Ich habe kein großes Interesse an Mechanik und so. Quantenphysik ist aber interessant, da habe ich mal eine Doku gesehen.	Ich denke ich bin mündlich ganz ok, schriftlich eher nicht so.	Bin mir noch nicht sicher. Entweder Grundkurs oder abwählen. Den Leistungskurs auf keinen Fall.

*Tabelle 5: Antworten der sieben Teilnehmer\*innen.*

## Rahmenbedingungen der Teaching Experiments

An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass die räumlichen und technischen Rahmenbedingungen für alle Teilnehmer\*innen größtenteils identisch waren. Sämtliche Teaching Experiments wurden in einem Zimmer des Gymnasiums, d.h. in einer für die Schüler\*innen gewohnten Umgebung, durchgeführt. Die Lernenden saßen dabei stets vor dem Lehrertisch in einem Sitzabstand von ca. 0,5 Metern zueinander. Des Weiteren stand allen Lernenden ein Tablet / Computer zum Arbeiten mit Cosmic@Web oder zum Recherchieren zur Verfügung. Kleine Unterschiede ergaben sich beim Ausfüllen der Arbeitsblätter / Protokolle, da einige Schüler\*innen das Bearbeiten der Aufgaben auf dem eigenen Tablet, also

in einer digitalen Form, bevorzugten. Die anderen Lernenden erhielten die Materialien in ausgedruckter Form.

Die Durchführung der Teaching Experiments fand stets zur gleichen Zeit statt. Das in zwei separate Sitzungen geteilte Experiment startete stets um 13 Uhr und eine Sitzung dauerte zwischen 90 und 120 Minuten. Es wurde darauf geachtet, dass am Ende aller Veranstaltungen stets ein zeitlicher Puffer vorhanden war, sodass nicht die Befürchtung entstand, die Akzeptanzbefragung frühzeitig aufgrund anderer Termine abbrechen zu müssen. Ein weiterer Punkt, dem Beachtung geschenkt wurde, beinhaltet die Zeit zwischen den beiden Sitzungen. Die Zeitdifferenz wurde so gering wie möglich gehalten, im besten Fall fanden die beiden Sitzungen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen statt. Dies gelang auch bei dem Großteil der Schüler\*innen, lediglich bei einer Gruppe (S3 und S4) fanden die Sitzungen in zwei aufeinander folgenden Wochen statt, also mit einer Zeitdifferenz von sieben Tagen.

### **3.6 Reflexion der Teaching Experiments**

Bei rückblickender Betrachtung der Teaching Experiments muss festgestellt werden, dass diese durch mehrere nur bedingt regelbare Variablen beeinflusst wurden. Dieses Kapitel soll dazu dienen, eine Übersicht über diese zu geben. Außerdem werden die damit einhergehenden Konsequenzen im Hinblick auf die Ergebnisinterpretationen diskutiert sowie Verbesserungsmöglichkeiten für weitere Forschungsprozesse erörtert.

Die erste Variable beschreibt die Anzahl der Jugendlichen, die an den Teaching Experiments teilnahmen. Es wurde zwar darauf geachtet, dass man durch die Vorbefragung zum Interesse an der Physik und an dem Physikunterricht einen möglichst breiten Querschnitt der Schüler\*innen abdeckt, jedoch könnte die statistische Aussagekraft der Akzeptanzbefragungen durch eine erhöhte Anzahl an Lernenden noch weiter gesteigert werden. Dies hätte zur Folge, dass man die Ergebnisse der Forschung verallgemeinern könnte, da der Einfluss statistischer Ausreißer weiter limitiert werden würde. Durch zukünftig stattfindende Akzeptanzbefragungen würde zudem der Einfluss der Corona-Pandemie auf das Leistungsniveau der Lernenden verringert werden. Die gleichbleibende Startzeit der Sitzungen, diese starteten stets 13 Uhr, diente dazu die Wirkung zufälliger Fehler wie

Stimmungsschwankungen, Erschöpfung, Stress, Müdigkeit etc. zu minimieren. Ob dies bei allen Teilnehmern\*innen gelang, kann nicht mit Sicherheit bestätigt werden.

Des Weiteren kann das Verhalten des Autors, im Folgenden Lehrperson genannt, während der Teaching Experiments reflektiert werden. Bei Betrachtung der Akzeptanzbefragungen aller vier Gruppen stellt man fest, dass das Verhalten der Lehrperson nicht immer gleichbleibend ist. Dies äußert sich vor allem in dem Geben von Tipps bei der Bearbeitung der Protokoll-Aufgaben im zweiten Teil der Experimente. Daraus folgt, dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Gruppen beeinträchtigt ist. Stattdessen wäre es von Vorteil gewesen den Lernenden mehr Freiraum zu geben, was sich in einer verringerten Anzahl von möglicherweise zu schnell erteilten Hinweisen und Erklärungen geäußert hätte. In Bezug auf die dritte Forschungsfrage, welche das Problemlöseverhalten der Teilnehmenden analysiert, kann man ebenfalls argumentieren, dass diese Frage besser durch das Erfragen von Absichten und Lösungsstrategien statt durch das bloße Beobachten der Arbeitsmuster beantwortet werden könnte. Auch dafür müsste die Verhaltensweise der Lehrperson angepasst werden.

Ein weiterer Aspekt, welcher in zukünftigen Forschungen optimiert werden könnte, ist die Wahl der Erhebungsinstrumente. Den strukturellen Rahmen der Teaching Experiments bildeten dabei die Concept-Maps. Das Erstellen dieser sollte einen Einblick in die Denkstrukturen der Lernenden geben und darüber hinaus das Vorwissen bzw. das während der Akzeptanzbefragungen erfasste Wissen widerspiegeln. Insgesamt hat diese Methode gut funktioniert, allerdings gibt es mehrere Probleme, die analysiert werden müssen. Die größte Schwierigkeit beim Einsatz der Concept-Maps als Erhebungsinstrument ist die fehlende Bekanntheit im Schulunterricht. Kein\*e einzige\*r Schüler\*in konnte den Begriff der Concept-Map einordnen, lediglich die Wortverwandtheit zum Begriff „Mind-Map“ wurde von manchen festgestellt. Als Konsequenz folgte, dass die Grundidee der Concept-Map erst an einem Beispiel zu einem anderen physikalischen Teilgebiet, der Elektrizitätslehre, erklärt werden musste. Durch diese Vorgehensweise konnte der Begriff zwar anschaulich erklärt werden, jedoch wurden die Lernenden ebenfalls in den Möglichkeiten des Erstellens der Concept-Maps eingeschränkt, da diese wahrscheinlich versuchten, sich an dem vorgestellten Beispiel

zu orientieren. Auch ähneln einige Concept-Maps eher Mind-Maps oder die Relationspfeile wurden nicht beschriftet.

Eine weitere Beobachtung, die beim ersten Anfertigen der Maps gemacht wurde, ist, dass nahezu alle Schüler\*innen ein beträchtliches Schamgefühl bezüglich der Unwissenheit zu unbekannten Themenkomplexen haben. Der eigenen Meinung nach leistungsschwächere Lernende fragten nach Anhaltspunkten, an denen sie sich orientieren könnten, und die Arbeit war geprägt von Unruhe und Unsicherheit. In zwei Gruppen wurde auch versucht, die Concept-Map heimlich als Partnerarbeit anzufertigen, was allerdings durch einen Hinweis seitens der Lehrperson unterbunden wurde. Ein Grund für dieses Problem könnte der generelle Leistungsdruck in der Schule sein. Die Schüler\*innen verbinden Wissen und gute Lernleistungen mit einem Gefühl von Stolz, schlechte Lernleistungen und Unwissenheit dagegen mit einem Gefühl von Scham. Diese Methode für das Erfassen des Vorwissens könnte also dafür gesorgt haben, dass die Lernenden gehemmt und weniger aufgeschlossen an die folgende Sitzung herangingen. Beim erneuten Erstellen der Concept-Maps am Ende der Teaching Experiments zeigten sich die Schüler\*innen dieser Arbeit aufgeschlossener, vermutlich da sie durch die vorher vermittelten Inhalte die Concept-Maps nun besser füllen konnten. Alternativ zu den Concept-Maps als Erhebungsmethode, um den Umfang des vermittelten Wissens zu überprüfen, wäre die Nutzung anonymisierte Fragebögen denkbar. Durch die Anonymität und das gewohnte Aufgabendesign, welches den Aufgaben aus Leistungskontrollen, Protokollen und Klassenarbeiten ähnelt, wären die Teilnehmenden den Fragebögen mit Sicherheit aufgeschlossener. Jedoch bringt auch das Verwenden von Fragebögen Schwierigkeiten mit sich. Im Themenkomplex der Astroteilchenphysik existieren zum Zeitpunkt des Schreibens dieser Arbeit noch keine durch Studien verifizierten Fragebögen. Ein weiterer Nachteil wäre, dass das Beantworten von Aufgaben womöglich nicht den Wissensstand der Lernenden korrekt wiedergibt, da nur spezielle Inhalte abgefragt werden können.

Ein anderer Aspekt, der gegebenenfalls verbessert werden könnte, ist die Nutzung des Diktiergeräts als weiteres Erhebungsinstrument. Dieses gibt das gesprochene Wort zwar wieder, jedoch ergeben sich Schwächen bei der Dokumentation der Arbeitsweisen der Schüler\*innen, zum Beispiel bei der Diagrammerstellung in Cosmic@Web oder beim

Recherchieren von Hintergrundinformationen zu einem Experiment. Durch die Nutzung einer Kamera könnten die Arbeitsweisen und Lösungsstrategien der Lernenden noch besser dokumentiert und analysiert werden. Ein mögliches Beispiel wäre, dass der\*die Teilnehmer\*in Informationen bezüglich der mittleren Lebensdauer des Myons recherchiert. Durch das Filmen könnte nachvollzogen werden, ob dabei eine typische Abfolge der besuchten Internetseiten vorhanden ist oder ob dies randomisiert geschieht. Auch Mimik und Gestik könnten dabei erfasst werden, um eventuelle Enttäuschung oder Reserviertheit zu dokumentieren. Bei Nichtnutzung der Kamera müsste die Lösungsstrategie permanent durch die Lehrperson erfragt werden und der\*die Jugendliche müsste seine Intentionen bis ins kleinste Detail jedes Mal beschreiben. Eine Aufzeichnung des Computer-Bildschirms durch ein geeignetes Computerprogramm wäre ebenfalls eine umsetzbare Alternative. Diese würde die Überprüfbarkeit der einzelnen Aktionen des\*der Lernenden erheblich verbessern.

Beim Analysieren der Aufgabengestaltung beziehungsweise der Aufgabenblätter können ebenfalls kleine Probleme identifiziert werden. Diese äußern sich zumeist durch eine für die Lernenden unvorteilhafte Aufgabenstellung. Ein gutes Beispiel dafür bildet die zweite Aufgabe des ersten Arbeitsblattes „Grundlagen der Astroteilchenphysik“. In dieser Aufgabe müssen die Schüler\*innen entscheiden, ob die Aussagen zum Standardmodell der Elementarteilchen richtig oder falsch sind. Die erste Aussage lautet dabei wie folgt: „Materie besteht aus drei Sorten von Elementarteilchen: Up-Quarks, Down-Quarks und Elektronen.“ Im vorherigen Erklärteil wurde jedoch betont, dass stabile Materie aus diesen drei Elementarteilchen besteht. Folglich waren die Schüler\*innen unsicher, ob mit dieser Aussage stabile Materie gemeint sei oder ob dies eine Fangfrage ist, da auch die anderen Quarks und Leptonen Materie bilden können, welche allerdings instabil ist. Dementsprechend muss die Aussage überarbeitet werden, sie lautet: „Stabile Materie besteht aus drei Sorten von Elementarteilchen: Up-Quarks, Down-Quarks und Elektronen.“ Auch beim Arbeitsblatt zur Wiederholung des Arbeitens mit Diagrammen hätte man in der Tabelle den Begriff „Definition“ besser durch den Begriff „Aufbau“ oder „Grundlegende Struktur“ ersetzen sollen. Dadurch hätten die Lernenden ein besseres Verständnis zu den Aufgabenanforderungen entwickelt. Ebenso bietet es sich an eine Liste der zur Bearbeitung der Protokolle erlaubten Hilfsmittel zu erstellen, um eventuellen Unklarheiten beim Bearbeiten der Aufgaben vorzubeugen. Im Protokoll zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer der Myonen ist es

zudem vorteilhaft, den Zeitunterschied  $\Delta t$  in  $\mu s$  in die Tabelle eintragen zu lassen und nicht in Sekunden, da die Einteilung der horizontalen Achse des Histogramms ebenfalls in  $\mu s$  dargestellt ist. Eine nach Durchführung der Teaching Experiments überarbeitete Version der Arbeitsblätter befindet sich im Anhang A.8. Dieser Punkt wird im fünften Kapitel dieser Arbeit erneut aufgegriffen.

Zu den bereits genannten Punkten kann hinzugefügt werden, dass das Zusammenwirken der unterschiedlichen Parameter, wie das physikalische Vorwissen der Schüler\*innen oder die erteilte Aufgabenstellung, von komplexer Natur und deshalb eher schwer beobachtbar ist. Die vorher festgelegten Beobachtungsschwerpunkte lassen sich besser bei extrovertierten Jugendlichen betrachten. Darauf zu schließen, dass diese Lernenden ebenfalls motivierter und an der Thematik interessierter sind, wäre jedoch ein Fehlschluss.

Nach dem Durchführen der Teaching Experiments können die folgenden Punkte positiv hervorgehoben werden. Die Akzeptanzbefragungen weisen eine logische und für alle Teilnehmenden nachvollziehbare Struktur auf. Besonders das Zusammenführen der Modelle der verschiedenen Teildisziplinen und die Einführung von Cosmic@Web als Werkzeug zur Untersuchung astroteilchenphysikalischer Fragestellungen bezeichneten die Lernenden als spannend und interessant. Womöglich hätte die Struktur der zweiten Sitzung dahingehend abgeändert werden können, sodass die Lernenden mit Cosmic@Web in einer zusätzlichen freien Explorationsphase gearbeitet hätten. Jedoch war dies aus zeitlichen Gründen nicht möglich, da die Teaching Experiments auch ohne diese Phase schon eine beträchtliche Dauer von insgesamt drei bis vier Stunden aufwiesen.



## 4 Auswertung

Der Durchführungszeitraum der insgesamt drei- bis vierstündigen Teaching Experiments erstreckte sich über zwei Monate, nämlich vom Dezember 2023 bis einschließlich Januar 2024. Die Akzeptanzbefragungen wurden vom Autor selbst mit sieben Schülern\*innen der zehnten Klassenstufe durchgeführt. Aufgrund der ungeraden Anzahl an Teilnehmer\*innen ergab es sich, dass die Befragungen in drei Gruppengesprächen mit jeweils zwei Jugendlichen und einem Einzelgespräch stattfanden. Nach Durchführung der Teaching Experiments wurde der Wortlaut dieser transkribiert. Anhand der im Vorfeld erfolgten Analysen der fachlichen Inhalte und des Online-Tools Cosmic@Web sowie anhand der in den Teaching Experiments gesammelten Erkenntnisse können nun die Forschungsfragen beantwortet werden. Auf deren Grundlage wird anschließend das erdachte Unterrichtskonzept vorgestellt sowie dessen grundlegende Kernpunkte erörtert.

### 4.1 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

#### 4.1.1 Akzeptanz der Grundideen und Lernzielkontrolle

Für die Untersuchung der Akzeptanz der fundamentalen Ideen der Astroteilchenphysik und der kosmischen Strahlung durch die Schüler\*innen wurden drei Akzeptanzstufen im Vorfeld beschrieben. Dabei wurden die von Burde (2018) definierten drei Stufen der Akzeptanz wortwörtlich übernommen. Burde (2018) unterscheidet dabei zwischen vollständiger, eingeschränkter und keiner Akzeptanz der Erklärungen. Diese drei Stufen können wie folgt beschrieben werden:

- **Vollständige Akzeptanz:** „Die durch den Interviewer vorgetragene Erklärung wird von dem Schüler ohne Einschränkungen akzeptiert bzw. dieser liefert von sich aus eine sehr gute Zusammenfassung der Erklärung.“ (Burde (2018), S 132)
- **Eingeschränkte Akzeptanz:** „Es wird Kritik an einzelnen Aspekten der Erklärung geäußert oder diese wird nur unter Einschränkungen akzeptiert. Dennoch kommt seitens des Schülers grundsätzliche Akzeptanz der Erklärung zum Ausdruck bzw. dieser fasst von sich aus die Erklärung zufriedenstellend zusammen.“ (Burde (2018) S. 132)

- **Keine Akzeptanz:** „Die Erklärung wird von dem Schüler für zu schwer erachtet bzw. nicht verstanden oder der Schüler antwortet nicht auf die Frage und liefert auch von sich aus keine sinnvolle Zusammenfassung der Erklärung.“ (Burde (2018) S. 132)

Den einzelnen Akzeptanzstufen wurden nach dem Vorbild von Burde (2018) drei Zahlenwerte zugeordnet, um eine metrische Skala zu schaffen, anhand derer das arithmetische Mittel berechnet werden kann. Dadurch können auf der einen Seite die Akzeptanz aller vorgestellten Lerninhalte durch eine\*n Schüler\*in betrachtet werden, auf der anderen Seite kann aber auch die Akzeptanz eines Modells bei allen Teilnehmenden ermittelt werden. Dabei gilt die folgende Zuordnung: vollständige Akzeptanz wird dem Zahlenwert 0 zugeordnet, eingeschränkte Akzeptanz wird dem Wert 0,5 zugeordnet und keine Akzeptanz wird dem Wert 1 zugeordnet. (vgl. Burde (2018), S. 132) Die folgende Tabelle veranschaulicht diese Zusammenhänge.

Schüler*in	Standardmodell der Kosmologie	Standardmodell der Elementarteilchen	Kosmische Strahlung	Ankunftsrichtung von Myonen	Mittlere Lebensdauer	Relativitätstheorie	Mittelwert
S1	0	0	0	0	0	0,5	0,083
S2	0	0	0	0	0	0,5	0,083
S3	0	0	0	0	0,5	1	0,25
S4	0	0	0	0	0,5	1	0,25
S5	0	0	0	0	0	0	0
S6	0	0,5	0	0,5	0,5	1	0,5
S7	0	0	0	0	0,5	1	0,25
Mittelwert	0	0,07	0	0,07	0,286	0,714	

*Tabelle 6: Akzeptanz der Grundideen.*

Bis auf die spezielle Relativitätstheorie wurden alle physikalischen Erklärungen entweder voll oder teilweise akzeptiert. Besonders stechen dabei das Standardmodell der Kosmologie, das Standardmodell der Elementarteilchen sowie die Erklärungen zur kosmischen Strahlung hervor, da diese von nahezu allen Lernenden vollständig akzeptiert wurden. Die im Kapitel 2.1.3 beschriebene Schülervorstellung über einen absoluten Raum und eine absolute Zeit wurde im Zusammenhang mit der Relativitätstheorie und der mittleren Lebensdauer von

Myonen offensichtlich. Viele Lernende fanden das Konzept der relativen Zeit unlogisch und äußerten offen Zweifel. Auch zeigte sich, dass manche Teilnehmenden die statistische Natur der Myon-Umwandlung nur zum Teil akzeptierten, was einer weiteren in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Schülervorstellung entspricht. Zur Paraphrasierung kann angemerkt werden, dass sowohl S5 als auch sämtliche Zweiergruppen die in der Erklärphase präsentierten Lehrinhalte fachlich korrekt und vollständig wiedergaben, dabei ergänzten sich die in Zweiergruppen teilnehmenden Schüler\*innen gegenseitig.

Zum Arbeiten mit Cosmic@Web kann festgestellt werden, dass die Lernenden dies positiv bewerten. S7 nannte die Möglichkeit zum Kombinieren der einzelnen Variablen in unterschiedlichen Diagrammen „beeindruckend“ und S5 nutzte den Begriff „faszinierend“ zur Beschreibung des Online-Tools. Auch die übrigen Schüler\*innen maßen dem Arbeiten mit dem Online-Tool eine große Bedeutung bei, wenngleich S3 und S4 sagten, dass sie sich von den zahlreichen Funktionen des Tools „erschlagen“ gefühlt hätten. Dies zeigt, dass sich die Wahl des einfachen Modus zur Diagrammerstellung als richtig erwiesen hat. Wie im Vorhinein vermutet, wäre die Nutzung des erweiterten Modus und dessen Funktionen von zu komplexer Natur für die Einbringung in eine Arbeitsphase in der 10. Klassenstufe.

Die im Vorfeld definierten Lernziele können nun ebenfalls überprüft werden. Alle Lernenden waren in der Lage, den passenden Diagrammtyp zur Visualisierung des Sachverhalts auszuwählen. S6 und S7 zeigten kleine Verständnisprobleme bei der Zuordnung der Variablen zu den Diagrammachsen, diese konnten jedoch leicht behoben werden, entweder durch eine Erklärung, im Fall von Schüler\*in 6, oder im Fall von Schüler\*in 7 selbstständig. Auch das zweite Lernziel wurde von nahezu allen Lernenden ohne Probleme erreicht. Die Schüler\*innen, welche keine schriftliche Interpretation lieferten, erklärten ihre Gedanken zum gegebenen Sachverhalt mündlich. Das dritte Lernziel, also die Bestimmung der mittleren Lebensdauer, wurde von allen Lernenden erreicht. Bei einzelnen Lernenden, zum Beispiel S3 und S6, war ein Verweis auf die dafür erforderliche Gleichung notwendig. Ansonsten zeigten die Jugendlichen keine Probleme beim Erreichen des Lernziels. Auch das vierte Lernziel wurde von allen Schülern\*innen erreicht. Die Zusammenhänge wurden dabei meist in Form von „je-desto“-Aussagen formuliert. Das letzte Lernziel wurde nicht von allen Lernenden erreicht bzw. nur teilweise erreicht. Beispielsweise recherchierten S1 und S2 zwar die physikalischen

Hintergründe zur speziellen Relativitätstheorie, gaben dieser aber nur mündlich wieder. Auch bei den übrigen Lernenden war die gegebene Erklärung eher kurz und allgemein gefasst, sodass in diesem Fall nicht von einem vollständigen Erreichen des Lernziels gesprochen werden kann.

#### **4.1.2 Kompetenzen beim Arbeiten mit Cosmic@Web**

Wie bereits im Kapitel 3.3 beschrieben, wurde die Grundlage zur Beantwortung dieser Forschungsfragen bereits durch die Analyse der bestehenden Forschungsliteratur, was das Beschreiben der bisherigen Einsätze von Cosmic@Web, aber vor allem die von Schwerdt et al (2021) zugeordneten Kompetenzbereiche miteinschließt. Darüber hinaus wurden weitere Fachkompetenzen (vgl. KMK (2020)) unter der entsprechenden Begründung vom Autor selbst hinzugefügt (siehe Kapitel 2.2.4). Deswegen erfolgt an dieser Stelle eine Zuschreibung der einzelnen Kompetenzen zu bestimmten in den Teaching Experiments geschaffenen Situationen im Zusammenhang mit einer Erörterung, welche das Erreichen / Abdecken der jeweiligen Kompetenz beschreibt.

Das Fördern der Sachkompetenzen S1, S2, S5 und S6 geschieht über das Bearbeiten der beiden Protokolle. S1 wird über den Rückbezug des physikalischen Vorwissens zur Erklärung der Ankunftsrichtung von Myonen und dem Einfluss der Temperatur auf die Myonenrate bedient. Das Modell der Temperatur als mittlere kinetische Energie von Teilchen ist nur ein Beispiel. Andere Beispiele wären das Standardmodell der Elementarteilchen über das der Myonenzerfall erklärt wird. Die in der Kompetenz S6 beschriebenen Phänomene / Auswerteverfahren sind in diesem Fall die Interpretationsschritte. Aber auch das Erstellen der Fit-Funktion zum Berechnen der mittleren Lebensdauer fördert diese Kompetenz. Die in der Kompetenz S2 beschriebenen „Gültigkeitsbereiche von Modellen und Theorien“ (Bildungsstandards (2020), S. 14) werden beim Bearbeiten der letzten Aufgabe des Protokolls „Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen“ behandelt. Bei dieser Aufgabe müssen die Lernenden darauf schließen, dass sich Myonen mit 99% der Vakuumlichtgeschwindigkeit bewegen und folglich die spezielle Relativitätstheorie zu deren Beschreibung verwendet werden muss. Die klassische Physik gilt dann nicht mehr. Die Lernenden erfahren über das Beantworten dieser Aufgabe die Grenzen der klassischen Physik und lernen zudem den

Gültigkeitsbereich für die relativistische Beschreibung von Objekten kennen. Durch das Erstellen der Materialliste sowie der Beschreibung des Tscherenkow-Effekts kann man ebenfalls S5 als Sachkompetenz ansehen, die durch die Teaching Experiments und den Umgang mit Cosmic@Web gefördert wird.

Das Arbeiten mit Cosmic@Web, einem digitalen Online-Tool zur Erforschung von naturwissenschaftlichen Phänomenen, impliziert die Erkenntnisgewinnkompetenzen E1, E4 und E6. Dabei muss angemerkt werden, dass die Entwicklung von Forschungsfragen zwar in den Teaching Experiments implementiert wurde, das konkrete Formulieren einer solchen Forschungsfrage war jedoch kein expliziter Bestandteil der Protokollaufgaben.

Das Fördern der Kommunikationskompetenzen kann ebenfalls im Rahmen der Teaching Experiments als bestätigt angesehen werden. Die Lernenden haben sowohl zu den Quellen kosmischer Strahlung (siehe Protokoll „Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen“) als auch zu den im Experiment verwendeten Materialien recherchiert, was die Kompetenz K1 beschreibt. Die anderen vier Kompetenzen K3, K5, K6 und K7 werden im Rahmen der Teaching Experiments nicht so umfassend gefördert, wie zum Beispiel die Sach- oder Erkenntnisgewinnkompetenzen. Um diese Kompetenzen zu fördern, müssen die Lernenden die von ihnen ausgewählten Inhalte angemessen präsentieren. Aufgrund des beschränkten Zeitumfangs der Akzeptanzbefragungen wurde auf diese Art der Präsentation verzichtet. Die Lösungen der Aufgaben wurden lediglich mündlich verglichen. Die einzelnen Kompetenzen wurden zwar bedient, zum Beispiel indem die Diagramme erstellt sowie interpretiert wurden und dies mündlich an die Lehrperson und ggf. den\*die andere\*n Teilnehmende\*n kommuniziert wurde, aber der Umfang des Förderns ist im Vergleich zu den anderen Kompetenzen recht klein. In dem in Kapitel 5 beschriebenen Unterrichtskonzept wird darauf geachtet, diese Kompetenzen im gleichen Maße zu fördern wie die anderen.

#### **4.1.3 Vermittlung der fachlichen Inhalte**

Zur Untersuchung der Frage, inwieweit sich über Cosmic@Web fachliche Lerninhalte vermitteln lassen, werden nun die von den Teilnehmenden erstellten Concept-Maps als Erhebungsinstrument herangezogen. Durch die Concept-Maps (siehe Anhang A.7) können vor allem zwei Parameter betrachtet werden, einerseits die Menge des erlangten Wissens, welches sich in der bloßen Anzahl der in den Concept-Maps vorkommenden Begriffe äußert. Andererseits die Vernetzung des Wissens bzw. der einzelnen Inhalte untereinander, welches über die Menge an Relationspfeilen evaluiert werden kann. Ein weiterer Indikator für das Verständnis und die Anwendbarkeit des erlangten Wissens, welcher zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage herangezogen werden kann und sollte, ist die Richtigkeit der Schüler\*innenantworten auf die Aufgaben der Arbeitsblätter und Protokolle, aber auch die Korrektheit in den Concept-Maps aufgeführten Begriffe.

#### **Fachliche Korrektheit des Wissens**

Bei Betrachten der Concept-Maps, die vor Beginn der Teaching Experiments erstellt wurden, fällt auf, dass die Teilnehmer\*innen ähnliche inhaltliche Kontexte für die von ihnen eingetragenen Begriffe verwendet haben. Bei fünf von sieben Teilnehmenden (S1, S2, S3, S5, S7) erkennt man, dass die aufgeführten Begriffe im Kontext einer Zerlegung des Wortes „Astroteilchenphysik“ in seine einzelnen Wortstämme erstellt wurden. So wird in diesen Concept-Maps zwischen astronomischen Begriffen und Begrifflichkeiten aus der Teilchenphysik, wie Proton oder Elektron, unterschieden. Besonderheiten, die beim Betrachten der Begriffe auffallen sind die folgenden: Die meisten der Begrifflichkeiten stammen aus dem schulischen Kontext des naturwissenschaftlichen Unterrichts in den Fächern Physik und Chemie. Wie eben schon beschrieben, tauchen Begriffe wie Proton, Elektron oder Neutron vergleichsweise oft auf (siehe S1, S2, S3, S4, S5). Dies ist darüber zu erklären, dass diese Begriffe im Schulkontext relativ häufig verwendet werden, sei es bei der Beschreibung einer Kernumwandlung beim Behandeln radioaktiver Strahlung oder beim Beschreiben des Aufbaus von Atomen und Molekülen oder beim Betrachten chemischer Reaktionen in der Chemie. Auch Begriffe, wie Himmelskörper, Sterne oder Weltall tauchen

auf, was über die starke Präsenz der Astronomie in den Medien und über das grundsätzliche Interesse, welches bei der Erforschung dieser Themen besteht, erklärt werden kann.

Auffälligkeiten sind dagegen bei Schüler\*in 1, Schüler\*in 5 und Schüler\*in 7 zu erkennen. Diese bestehen vor allem in dem Aufzählen von Begriffen, die bis dahin keine große Rolle im Schulunterricht innehatten bzw. erst in späteren Jahrgängen ausführlich behandelt werden. Zum Beispiel zählt S1 die Begriffe „String“ bzw. „Stringtheorie“ auf. Dies setzt er\*sie dabei in den Kontext, dass Quarks, die ebenfalls in der Concept-Map von S1 erwähnt wurden, aus Strings aufgebaut sind und diese folglich als kleinstmögliche Bestandteile der Materie gelten. Gründe für diese Wahl könnten darin liegen, dass es sich bei der String-Theorie um eine moderne Theorie handelt, wahrscheinlich ist jedoch ebenfalls die Bekanntheit dieser Theorie durch die TV-Serie „The Big Bang Theory“ in der die String-Theorie regelmäßig erwähnt wird. Ein weiterer Begriff, der von S7 aufgeführt wurde, sind „Quanten“ und deren Benennung als kleinste Teilchen. Auch der Begriff „Quantenverschränkung“ wird von S7 genannt. Die Begründung, warum diese Begriffe genannt wurden, folgt analog zu der vorherigen Argumentation. Auch die Quantenphysik bezeichnet ein modernes Forschungsfeld und taucht regelmäßig vor allem in Verbindung mit Quantencomputern und -kryptografie in den Medien auf. Ein Beispiel für ein solches Auftauchen wäre die Vergabe des Chemie-Nobelpreises im Jahr 2024 für die Erforschung von Quantenpunkten.

Als letzte Auffälligkeit ist die von S5 erarbeitete Concept-Map zu nennen. Diese hebt sich von den anderen vor allem durch die große Anzahl an Begriffen ab, welche vor allem aus dem Kontext der Teilchenphysik (Neutron, Proton, Elektron) sowie der radioaktiven Strahlung (Alphastrahlung, Betastrahlung, Gammastrahlung, Isotope) stammen. Hier muss darauf verwiesen werden, dass es sich bei der radioaktiven Strahlung zwar ebenfalls um elektrisch geladene und energiereiche Teilchen handelt, jedoch entsteht diese nicht auf die gleiche Weise wie die kosmische Strahlung. Es besteht demnach keine direkte Relation zwischen der Astroteilchenphysik und der Radioaktivität. Was ebenfalls auffällt, ist das Vorkommen vieler moderner Begriffe aus der Astronomie wie „schwarzes Loch“ oder „Plasma“. Hier kann ebenfalls die Argumentation über den großen Bekanntheitsgrad solcher Begriffe geführt werden. Ausgehend von den Concept-Maps kann also geschlussfolgert werden, dass vor allem moderne Medien und die Häufigkeit des Auftauchens im außerschulischen Kontext das

Vorwissen um physikalische Inhalte prägt. Natürlich ist ebenfalls der Schulunterricht ein prägender Faktor, der einen großen Einfluss auf das bestehende Wissen der Lernenden hat.

Die Concept-Maps, welche im Anschluss an die Teaching Experiments erstellt wurden, werden nun ebenfalls hinsichtlich ihrer fachlichen Korrektheit und ihres prinzipiellen Aufbaus ausgewertet. Hier stellt man vor allem fest, dass sich die meisten Lernenden an der inhaltlichen Struktur der ersten Sitzung orientiert haben. Konkret bedeutet dies, dass die drei grundlegenden Wissenschaften Astronomie, Kosmologie und Teilchenphysik als Ansatzpunkte für die weitere Gestaltung genutzt wurden. Beobachten kann man dies bei S3, S4, S5 und S7. Auch bei S1 und S2 tauchen diese Begriffe auf, jedoch nehmen sie nicht so eine zentrale Rolle in der Concept-Map ein. Ausgehend von diesen drei großen Begriffen wurden weitere Inhalte ergänzt, bei denen viele Begriffe im Bezug zum Standardmodell der Elementarteilchen, zur kosmischen Strahlung und zu deren Nachweis stehen. Das Arbeiten mit Cosmic@Web oder das Arbeiten mit Diagrammen wird in den Concept-Maps von S1, S2, S3, S4 und S5 erwähnt. Interessant ist dabei, dass S2 und S5 das Arbeiten mit Cosmic@Web in engem Bezug zu den anderen Begriffen gesetzt haben. Es finden sich zum Beispiel Querverweise auf Myonen und den Tscherenkow-Effekt. Bei den anderen Teilnehmern\*innen wird das Arbeiten mit Cosmic@Web isoliert von den fachlichen Inhalten betrachtet. In den Concept-Maps von S1 und S4 sieht man diese Trennung sehr deutlich durch Trennlinien / Klammern. Eine Gemeinsamkeit, die alle Concept-Maps aufweisen, die Cosmic@Web erwähnen, ist der Bezug zu realen Experimenten und zur Datenauswertung, d.h. also zur typischen Arbeitsweise mit dem Tool.

Des Weiteren ist interessant, dass beim Umgang mit Cosmic@Web / Diagrammen vor allem der Aspekt der Durchführung betont wird, also das Erstellen / Plotten von Diagrammen. Bei S1 und S5 sind zum Beispiel skizzenhafte Zeichnungen der erstellten Diagramme beigelegt. Bei S3 und S4 werden einzelne Diagrammtypen und die Funktion des Auswertens von Diagrammen beleuchtet. Die konkreten Ergebnisse der Protokolle, also der genaue Wert der mittleren Lebensdauer sowie die Schlussfolgerung der Abhängigkeiten der Myonenrate werden fast nicht beleuchtet, nur S2 benennt den genauen Zahlenwert der mittleren Lebensdauer. Folglich wird dem Arbeitsweg, also dem Prozess des Erstellens und Auswertens von Diagrammen, von den Lernenden eine größere Priorität eingeräumt als das Aufzählen der



exakten Experimentiererergebnisse. Die Arbeitsweise mit Cosmic@Web steht bei den Lernenden im Vordergrund. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Concept-Maps durchgängig eine hohe fachliche Korrektheit aufweisen, d.h. sämtliche Begriffe sind korrekt erklärt bzw. stehen im richtigen Zusammenhang.

Einen weiteren, bereits erwähnten Ansatzpunkt für das Verständnis der vermittelten Inhalte bietet die Richtigkeit der von den Schülern\*innen gelösten Aufgaben (siehe Teaching Experiments – Anhang). Um eine quantitative Auswertung zu ermöglichen, wurde sich erneut an Burde (2018) orientiert. J.-P. Burde (2018) definiert drei Qualitätsstufen von Antworten. Diese sind im Folgenden dargestellt.

- **Gute Antwort:** „Der Schüler hat die Aufgabe ohne nennenswerte Schwierigkeiten und Hilfen lösen und seine Antworten ggf. korrekt begründen können.“ (Burde (2018), S. 136)
- **Befriedigende Antwort:** „Der Schüler benötigte beim Lösen der Aufgabe kleine Hilfestellungen und gab ggf. unklare Begründungen für seine Antworten.“ (Burde (2018), S. 136)
- **Mangelhafte Antwort:** „Der Schüler konnte die Aufgaben nicht oder nur mit – auch im Vergleich zu anderen Schülern – sehr viel Hilfe beantworten bzw. zeigte bei der Begründung große konzeptionelle Unsicherheit bzw. Fehlvorstellungen.“ (Burde (2018), S. 136)

Analog zum Erfassen der Akzeptanz der Grundideen wird auch diesen drei Stufen ein Zahlenwert zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt ebenfalls analog zu Burde (2018), so wird eine gute Antwort dem Zahlenwert 0 zugeordnet, eine befriedigende Antwort dem Zahlenwert 0,5 und eine mangelhafte Antwort dem Zahlenwert 1 (vgl. Burde (2018), S. 136). In den folgenden drei Tabellen sind die von den Lernenden gegebenen Antworten auf jede Aufgabenstellung der drei Arbeitsblätter und der zwei Protokolle abgebildet. Zur besseren Visualisierung sind die einzelnen Tabelleneinheiten farblich hinterlegt.

Arbeitsblatt	Grundlagen der Astroteilchenphysik			Kosmische Strahlung		Arbeiten mit Diagrammen			Mittelwert
Aufgabenr.	1	2	3	1	2	1	2	3	
S1	0	0	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0,1875
S2	0	0	1	0,5	0,5	0	0	0	0,25
S3	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0,0625
S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0,5	0	0,5	0	0	0,5	0	0	0,1875
S6	0,5	0	0	0	0,5	0	0	0	0,125
S7	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0,0625
Mittelwert	0,143	0	0,286	0,214	0,286	0,07	0	0	
Mittelwert (AB)	0,143			0,25		0,023			

*Tabelle 7: Übersicht der Richtigkeit der Antworten in den drei Arbeitsblättern.*

Arbeitsblatt	Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen							Mittelwert
Aufgabenr.	1	2	3	Versuchsaufbau	2	3	4	
S1	0,5	0	0,5	0	0	0	0	0,143
S2	0	0	0	0	0	0	0	0
S3	0	0,5	0,5	0	0,5	0	0	0,214
S4	0	0,5	1	0	0	0	0	0,214
S5	0	0,5	1	0	0	0	0	0,214
S6	0	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,428
S7	0,5	0	0	0	1	0,5	0	0,286
Mittelwert	0,143	0,286	0,571	0	0,214	0,143	0,07	
Mittelwert (Protokoll)	0,203							

*Tabelle 8: Übersicht der Richtigkeit der Antworten im ersten Protokoll.*

Arbeitsblatt	Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen							Mittelwert
Aufgabenr.	1	2	Versuchsaufbau	4	5	6	7	
S1	1	0	0	0	0,5	0	0,5	0,286
S2	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0,143
S3	0	0	0	0	0	0,5	0	0,07
S4	0	0	0	0	0	0,5	0	0,07
S5	0	1	0	0	0,5	0	0,5	0,286
S6	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0,143
S7	0	0	0	0,5	1	0	0,5	0,286
Mittelwert	0,286	0,143	0	0,07	0,286	0,143	0,357	
Mittelwert (Protokoll)	0,163							

*Tabelle 9: Übersicht der Richtigkeit der Antworten im zweiten Protokoll.*

Anhand der Tabellen und der arithmetischen Mittel kann festgestellt werden, dass alle Schüler\*innen im Mittel gut bis sehr gut mit den gestellten Aufgaben zurechtkamen bzw. diese mit einer hohen fachlichen Richtigkeit lösen konnten. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass die von den Lernenden angegebene Akzeptanz der fachlichen Erklärungen nicht in direktem

Zusammenhang mit der Richtigkeit der Aufgabenlösung steht. Beispiele dafür wären das Standardmodell der Elementarteilchen und die kosmische Strahlung. Obwohl diese von allen als vollständig bzw. von S6 als teilweise akzeptiert wurden, so zeigen sich dennoch Anzeichen für das Vorhandensein nur befriedigender Antworten. Eine Ausnahme bildet hierbei die Relativitätstheorie, die mit einem Akzeptanz-Mittelwert von 0,714 von den Lernenden nicht akzeptiert wurde. Das Lösen der dazugehörigen Aufgabe fiel in diesem Zusammenhang eher befriedigend aus.

Darüber hinaus kann man feststellen, dass das zweite Arbeitsblatt zur kosmischen Strahlung den höchsten Mittelwert und damit die qualitativ niedrigste fachliche Korrektheit aufweist. Die Gründe dafür könnten in der zu lang andauernden Erklärphase liegen, in der die Lernenden nicht sämtliche Inhalte, die präsentiert wurden, verarbeiten konnten. Die Wiederholung zum Arbeiten mit Diagrammen liefert den niedrigsten Mittelwert, dort traten folglich die wenigsten Fehler auf. Gründe hierfür könnten die schon genannten Anknüpfungspunkte in anderen Fächern, wie zum Beispiel Mathematik sein, in denen das Arbeiten mit Diagrammen ebenfalls thematisiert wird.

Beim Betrachten der beiden Protokolle fällt auf, dass deren berechnete Durchschnitte im Mittelbereich aller Arbeitsmaterialien liegen. Elemente der Protokolle, welche sehr gut gelöst werden konnten, waren einerseits das Erstellen der Materialliste und andererseits die Wahl des Diagrammtypen sowie der Einbezug des physikalischen Fachwissens bei der Interpretation der Diagramme. Besonders das xyz-Diagramm bei der CosMO-Mühle wurde umfassend interpretiert und auch die Berechnungen zur mittleren Lebensdauer sowie zur Geschwindigkeit von Myonen weisen wenige Fehler auf. Die häufigste Fehlerquelle besteht in dem ungenauen Beantworten der letzten Frage des zweiten Protokolls. Aussagen und Eigenschaften der Relativitätstheorie wurden meist nur grob beschrieben, um das Verhalten von Myonen zu erklären. Fachbegriffe aus dem Kontext der Relativitätstheorie, wie zum Beispiel die Zeitdilatation, wurden nicht verwendet.

## Menge des Wissens

In den folgenden Absätzen wird die Menge des Wissens der einzelnen Lernenden anhand der von ihnen erstellten Concept-Maps vor und nach den Teaching Experiments analysiert. Die Anzahl der Begriffe wird dabei zunächst in einer Tabelle zur besseren Visualisierung dargestellt. Anschließend erfolgt das Erläutern von Schlussfolgerungen und von eventuellen Auffälligkeiten.

Schüler*in	Anzahl der Begriffe / Begriffsgruppen vor Durchführung der Teaching Experiments	Anzahl der Begriffe / Begriffsgruppen nach Durchführung der Teaching Experiments	Prozentuale Steigerung
S1	9	28	211%
S2	7	40	471%
S3	10	43	330%
S4	8	28	250%
S5	28	30	7%
S6	4	8	100%
S7	5	19	280%
Mittelwert	10,14	28	235,57%

*Tabelle 10: Menge der in den Concept-Maps verwendeten Begriffe.*

Generell lässt sich ein großer Anstieg in der Anzahl der von den Lernenden geschriebenen Begriffe / Begriffsgruppen erkennen. Präsent sind dabei vor allem die Begriffe aus der ersten Sitzung, in welcher die Grundgedanken der Astroteilchenphysik, der drei Wissenschaften, des Standardmodells der Elementarteilchen und der kosmischen Strahlung erarbeitet wurden. Vor allem die Kernaussagen des Standardmodells der Elementarteilchen, aber auch die Nachweismöglichkeiten für die sekundäre kosmische Strahlung nehmen dabei einen großen Teil der Concept-Maps ein. Die Präsenz von Cosmic@Web und den damit verbundenen Arbeitsweisen kann in den Concept-Maps bei fünf von sieben Schüler\*innen festgestellt werden. In den Concept-Maps, die das Vorwissen erfassen, tauchten Begriffe des wissenschaftlichen Arbeitens oder Experimentierens kein einziges Mal auf. Nach Durchführung der Akzeptanzbefragungen bilden die mit Cosmic@Web und dem Arbeiten mit Diagrammen verbundenen Begriffe / Begriffsgruppen einen prozentualen Anteil von ca. 20 % bis 30% in den jeweiligen Concept-Maps.

Im Zusammenhang mit Cosmic@Web bilden Diagramme, d.h. Skizzen von Diagrammen, welche untersucht wurden und aufgezählte Diagrammtypen, einen großen Anteil. Dabei ist bei S1 und S5 die Skizze des xy-Diagramms zur Bestimmung der Ankunftsrichtung der Myonen vorhanden, welches den Sachverhalt korrekt veranschaulicht. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass S5 keine Achsenbeschriftung vornahm und die bei S1 beschriebene Größe der Myonenanzahl fachlich nicht völlig korrekt ist. Bei S2, S3 und S4 sind zwar keine Skizzen vorhanden, aber Diagramme werden als Auswertungswerkzeug beschrieben. Begriffe aus der Relativitätstheorie, welche im Zusammenhang mit der mittleren Lebensdauer behandelt wurde, tauchen dabei nicht auf. Nur die Eigenschaft, dass sich Myonen fast so schnell wie das Licht bewegen, was zum Beispiel von S2 erwähnt wird, kann in diesen Sachzusammenhang eingeordnet werden.

Der größte Anstieg in der Menge der verwendeten Begriffe lässt sich bei Schüler\*in 2 feststellen, welche einen prozentualen Anstieg von 471% aufweist. Dies könnte in Verbindung mit den vergleichsweise häufigen Nachfragen während der Erklärphasen stehen. Den kleinsten prozentualen Anstieg beobachtet man bei Schüler\*in 5 mit 7%, jedoch muss angemerkt werden, dass die entsprechende Concept-Map, die nach Durchführung der Teaching Experiments angefertigt wurde, mit insgesamt 30 Begriffen / Begriffsgruppen immer noch über dem arithmetischen Mittel liegt. Wichtig ist an dieser Stelle zu betonen, dass sich dieser Anstieg in der Menge der Wortelemente bei jedem\*r Schüler\*in feststellen lässt, auch wenn diese unterschiedlich groß ausfallen. Der Grund dafür liegt vermutlich in dem kaum vorhandenen Vorwissen zur Astroteilchenphysik.

Betrachtet man hingegen den absoluten Anstieg bei der Anzahl der in die Concept-Maps integrierten Begriffe, so stellt man fest, dass S6 den kleinsten Anstieg verzeichnet. Die aufgeführten Begriffe bilden zwar alle einen Bezug zur kosmischen Strahlung, wie zum Beispiel die Nennung des Begriffs „Myon“ oder die Unterteilung in primäre und sekundäre kosmische Teilchen, jedoch finden sich keine Verweise auf das Arbeiten mit Cosmic@Web. Auch ist an dieser Stelle anzumerken, dass S6 den zentralen Begriff „Astroteilchen“ in beiden Concept-Maps verwendete. Dies entspricht nicht der vom Autor gegebenen Aufgabenstellung, die fordert, den zentralen Begriff „Astroteilchenphysik“ zu verwenden. Es ist also möglich, dass der\*die Lernende die Aufgabenstellung falsch verstanden und von diesem Ausgangspunkt die

Gestaltung der Concept-Maps vollzogen hat. Diese Erklärung schließt sich an die Analyse der Richtigkeit des fachlichen Wissens an, da zwar bei S6 einige Aufgaben nur befriedigend / mangelhaft beantwortet wurden, z.B. aufgrund der Wahl eines falschen Diagrammtyps. Jedoch konnte bei den ersten drei Arbeitsblättern sowie bei der Durchführung des zweiten Protokolls eine hohe fachliche Korrektheit der Antworten festgestellt werden.

An dieser Stelle ist jedoch anzumerken, dass sich das Auszählen der einzelnen Begriffe als schwierig erwiesen hat, da man die Trennung von zwei Begriffsgruppen nicht immer eindeutig feststellen konnte. Dieser Punkt wird in den folgenden Absätzen noch weiter ausgeführt, da er durch die von den Teilnehmern\*innen gewählte Strukturierung der Concept-Maps beeinflusst wird.

### Vernetzung des Wissens

Zum Analysieren dieses Operators wird die Anzahl der in den Concept-Maps verwendeten Verbindungselemente erfasst. Die Anzahl dieser ist der folgenden Tabelle veranschaulicht.

Schüler*in	Anzahl der Relationspfeile / Verbindungslinien vor Durchführung der Teaching Experiments	Anzahl der Relationspfeile / Verbindungslinien nach Durchführung der Teaching Experiments	Prozentuale Steigerung
S1	8	9	12,5%
S2	7	38	442,86%
S3	8	34	325%
S4	8	25	212,5%
S5	29	34	17,24%
S6	3	7	133%
S7	3	13	333%
Mittelwert	9,43	22,86	142,4%

*Tabelle 11: Anzahl der verwendeten Verbindungselemente.*

Auch in diesem Punkt lässt sich bei allen Teilnehmern\*innen eine größer werdende Anzahl an Strukturierungselementen, wie Pfeilen oder Verbindungslinien, feststellen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass passend zum Gedanken der Organisation des Wissens im Langzeitgedächtnis, an dieser Stelle eine komplexer werdende Struktur des Wissens

beobachtbar wird. Analog zu der analysierten Menge an Begriffen verzeichnet auch in diesem S2 den größten prozentualen Anstieg an verwendeten Pfeilen.

Jedoch ergibt sich an dieser Stelle ein Problem beim Analysieren der Concept-Maps. Wie bei der Reflexion der Teaching Experiments (siehe Kapitel 3.6) beschrieben, ähnelt die Struktur der meisten erstellten Übersichten eher Mind-Maps. Besonders deutlich ist dies bei S1, S3, S4 und S6. Das bedeutet, es befinden sich wenig Querverweise auf andere Begriffe, vielmehr sind die Begriffe hierarchisch strukturiert, d.h. einem Oberbegriff werden mehrere Begriffe untergeordnet. Im Fall von S6 kann man dies klar beobachten, dort befindet sich keine einzige Verbindungslinie zwischen zwei „gleichrangigen Begriffen“. Auch ist ersichtlich, dass bei S1 die Anzahl der Pfeile keine große Aussagekraft hinsichtlich der Wissensstrukturierung besitzt. Im Fall von S1 ähnelt die erstellte Struktur eher einer Mind-Map, mit wenigen Unterteilungen, aber einer großen Anzahl von Begriffen, die zur Beschreibung eines jeden Punktes genutzt wurden.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Relationspfeile, sofern vorhanden, meistens unbeschriftet sind. Die einzige Ausnahme bildet hierbei die Concept-Map von S2. Die von S5 gezeichneten Pfeile sind lediglich mit „bezieht sich auf“ beschriftet. Im Fall von S3 und S4 sind die Pfeile nicht beschriftet, bei S7 nur wenige Pfeile. Der Grund könnte darin liegen, dass den Lernenden die Organisationsform einer Concept-Map völlig neu war. Kein\*e einzige\*r gab an, dass ihm\*ihr der Begriff der Concept-Map vertraut sei.

## **Zusammenfassung**

Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich Cosmic@Web durchaus dafür eignet, fachliche Inhalte aus der Astroteilchenphysik zu vermitteln. Indikatoren dafür sind die gestiegene Anzahl der Begriffe sowie die größer werdende Anzahl der verwendeten Verbindungselemente. Auch der hohe Grad an fachlicher Korrektheit der in den Concept-Maps verwendeten Begriffe und der Lösungen (in den Protokollen) zeigen, dass sich Cosmic@Web zum Vermitteln astroteilchenphysikalischer Inhalte eignet. Besonders die Natur des wissenschaftlichen Arbeitens, also ausgehend von theoretischen Vorüberlegungen über das Erstellen von Diagrammen bis hin zum Auswerten dieser Diagramme, wird über

Cosmic@Web sehr anschaulich sowie realitätsnah vermittelt und ist darüber hinaus im Gedächtnis der Schüler\*innen präsent. Belege dafür sind, dass sich die Begriffe in den Concept-Maps zu einem relativ großen Anteil an Cosmic@Web und der damit verbundenen Arbeitsweise orientieren. Die fachlichen Inhalte orientieren sich zwar anhand ihrer Struktur eher an der ersten Sitzung, jedoch kann man über die Analyse der Richtigkeit der Antworten auf die Protokollaufgaben (im Rahmen der zweiten Sitzung) ebenfalls argumentieren, dass viele fachliche Inhalte über Cosmic@Web vermittelt werden konnten.

Die gewählte Struktur der meisten fachlichen Inhalte, also das Einordnen von Begriffen in die Wissenschaften Astronomie, Kosmologie und Teilchenphysik, lässt sich über zwei Annahmen begründen. Die erste Annahme besteht darin, dass die Schüler\*innen ausgehend vom Schulunterricht es gewohnt sind, erlernte Inhalte in einer vorgegebenen Struktur, zum Beispiel wie diese Inhalte auf der Tafel oder im Hefter veranschaulicht sind, wiederzugeben. Diesem Gedanken folgend ist es möglich, dass die Struktur der Concept-Maps von der ersten Aufgabe des Arbeitsblattes zu den Grundlagen der Astroteilchenphysik inspiriert wurde. Die andere Annahme besteht darin, dass der Gedanke eines physikalischen Denkgebäudes den Lernenden sehr zusagt. Das logische Verbinden von unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen zum Verfolgen eines großen Ziels, in diesem Fall dem Finden der Weltformel, erscheint den Lernenden als logisch.

#### **4.1.4 Problemlöseverhalten beim Arbeiten mit Cosmic@Web**

In diesem Abschnitt der Arbeit wird das von den Lernenden beim Umgang mit Cosmic@Web gezeigte Problemlöseverhalten analysiert. Als Erhebungsinstrument werden dafür die Notizen des Autors genutzt, welche im Anhang A.2 dargestellt sind. Die Auswertung gliedert sich nach zwei Gesichtspunkten: einerseits das gezeigte Problemlöseverhalten beim Erstellen von Diagrammen und andererseits das gezeigte Problemlöseverhalten beim Auswerten von Diagrammen.



## Gezeigtes Problemlöseverhalten beim Erstellen von Diagrammen

Es fällt auf, dass grundsätzlich alle Lernende ein ähnliches Problemlöseverhalten zeigen. Dies äußert sich in der Ähnlichkeit der genutzten Ressourcen, dem Evaluieren der problem-solving actions, aber auch in dem möglichen Transfer auf andere Probleme. In den folgenden Absätzen wird das Verhalten der Lernenden anhand des Modells zum Problemlöseverhalten in die vier Phasen eingeordnet. In der entsprechenden Phase wird zusätzlich die Auswertung der in Kapitel 3.3 beschriebenen Operatoren vorgenommen.

Die erste Phase, in der das vorhandene Problem von dem\*r Teilnehmer\*in identifiziert werden muss, wird von allen Schülern\*innen erfolgreich absolviert. Diese Phase wird über das Lesen der Aufgabenstellung, welche das Bestimmen des Diagrammtyps und die Wahl der geeigneten Variablen beinhaltet, dargestellt. Auch die Einschätzung, ob das Problem gelöst werden soll, wird von allen Teilnehmenden bejaht, was sich in dem anschließenden Bearbeiten der Aufgabe äußert. Der nächste Punkt in der zweiten Phase des Problemlöseverhaltens ist das Suchen nach geeigneten Ansätzen und Lösungsstrategien unter Einsatz geeigneter Ressourcen. Es fällt auf, dass nahezu alle Lernenden die gleichen Ressourcen zur Lösung der Aufgabe nutzten. Dabei wird von allen Schülern\*innen zunächst das dritte Arbeitsblatt zur Wiederholung von Diagrammen genutzt, um die Eigenschaften der jeweiligen Diagrammtypen zu recherchieren. Einzelne Teilnehmende vergleichen dabei die in der tabellenartigen Übersicht (siehe Aufgabe 2) aufgeführten Diagrammtypen mit Begriffen aus der Aufgabenstellung. Die meisten Lernenden gehen anschließend direkt in die dritte Phase über und betrachten keine weiteren Lösungsstrategien / Informationsquellen. Lediglich S5 und S2 verwendeten als zusätzliche Ressource ebenfalls die Cosmic@Web-Seite, auf der die einzelnen Experimente sowie die wichtigsten Informationen und einige Beispieldiagramme aufgeführt waren. S3 und S7 verwendeten als weitere Informationsquelle die Aufgabenstellung und glichen darin vorkommende Begriffe mit der Tabelle ab. Die dritte Phase des Problemlöseverhaltens, in der sich für eine Handlungsweise entschieden und diese ausgeführt wird, konnte man bei allen Schülern\*innen beobachten. Diese äußert sich in dem selbstständigen Auswählen des Diagrammtyps aus den vorgegebenen Möglichkeiten als auch in der Belegung der einzelnen Variablen. Bei einzelnen Lernenden konnte festgestellt werden, dass die Informationssuche nicht ausreichend war, da sie sich bei der Lehrperson bzgl. des zu

verwendenden Datensatzes erkundigen mussten. Die in Phase vier stattfindende Evaluation der Problemlösung äußert sich dabei zum größten Teil in dem Befragen der Lehrperson. So wird das erstellte Diagramm der Lehrkraft gezeigt und gefragt, ob dies die richtige Lösung sei. Eine selbstständige Evaluation über das erneute Recherchieren oder einen eventuellen Vergleich mit einem Beispieldiagramm findet bis auf eine Ausnahme nicht statt. Nur S5 nutzte die dargestellten Beispieldiagramme, um die Lösung zu überprüfen.

Zur fachlichen Korrektheit der Lösungen ist anzumerken, dass es allen Schülern\*innen gelang, den richtigen Diagrammtypen beim ersten Versuch auszuwählen. Fehler tauchten lediglich beim Zuordnen der Variablen auf, so ordnete S6 zum Beispiel den Einfallswinkel der y-Achse zu und die Myonenrate der x-Achse (siehe Teaching Experiment Materialien – Gruppe 4). Auch S7 wählte die falsche Einheit zum Erstellen des 1D-Histogramms, korrigierte sich jedoch selbstständig, indem sie die Aufgabenstellung nochmals las und darauf die passende Änderung im Diagrammerstellungsmodus ausführte.

Mögliche Gründe für dieses überwiegend gleiche Problemlöseverhalten könnten in der Tatsache liegen, dass alle Lernenden in derselben Klassenstufe bei derselben Lehrkraft Physikunterricht erhalten und dies seit Anbeginn ihres Physikunterrichts in der sechsten Klassenstufe. Laut Lana Ivanjek et al. (2016) besteht das Arbeiten mit Diagramm für viele Lernende in einer erlernten Reihenfolge von Arbeitsschritten (vgl. Ivanjek et al. (2016), S. 2), die hier von den Lernenden in der gleichen Art und Weise entsprechend ihres Erlernens angewendet werden. Zu einem möglichen Transfer auf ähnliche Problemsituationen kann man feststellen, dass das Übertragen der Lösungsstrategie bedingt möglich ist. Die Voraussetzung liegt darin, dass der geeignete Diagrammtyp umschrieben wird, folglich keine offene Informationssuche nötig ist. Sollte diese doch vonnöten sein, indem man zum Beispiel nur die Messdaten zur Verfügung hat, die Art und Weise für die Auswertung aber selbstständig festlegen muss, so kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass dies erfolgreich von den Lernenden absolviert werden kann.

## **Gezeigtes Problemlöseverhalten beim Auswerten von Diagrammen**

Der Ansatz zur Beantwortung der Forschungsfrage in diesem Kontext gleicht dem vorherigen. Auch in diesem Zusammenhang erkennen alle Lernenden das vorliegende Problem in der ersten Phase des Problemlöseverhaltens durch die vorliegende Aufgabenstellung, die eine Handlungsaufforderung an die Jugendlichen stellt. Analog zum Erstellen von Diagrammen zeigen auch in diesem Fall alle Lernenden, dass das Problem eine Relevanz für sie besitzt und sie dieses lösen möchten, indem sie mit dem Entwerfen von Lösungsstrategien beginnen. Von den Lernenden eingesetzte Ressourcen, die zum Entwerfen einer Lösungsstrategie genutzt werden, bestehen dabei wieder in dem Verwenden des Diagramm-Arbeitsblattes (dieses wird von allen Lernenden genutzt) und dem Gebrauchen der Experimente-Datenbank (vgl. DESY-Experimente), die von S1, S2 und S5 genutzt wird. Anders als beim Erstellen der Diagramme wird in dieser Situation jedoch auch die Lehrperson als Informationsquelle angesehen, welche konsultiert werden kann. Dieses Verhalten wird beispielsweise von S3, S6 und S7 gezeigt. Anstatt eigenständig zu recherchieren, zum Beispiel im Internet, wenden sich diese Lernenden ohne die Verwendung weiterer Ressourcen an die Lehrperson, zum Beispiel um die Formel für die gleichförmige Bewegung zu erfragen. Eine Begründung für das gezeigte Verhalten könnte sein, dass der mit dieser Handlung verbundene Aufwand als am geringsten eingeschätzt wird. Es wäre aber auch möglich, dass die Lernenden den eigenen Wissensstand und ihre eigenen Fähigkeiten in dem bis dahin unbekannten Themengebiet der Astroteilchenphysik als zu gering einschätzen, um selbstständig Problemlösehandlungen zu entwerfen und zu analysieren. Die schließlich ausgeführten Schritte zur Diagramminterpretation, also die problem-solving action, orientieren sich dabei stets an der dritten Aufgabe des Diagramm-Arbeitsblattes.

Beim Einbezug physikalischen Fachwissens zum Lösen der weiteren Auswertungsaufgaben ergibt sich das folgende Verhalten. Die verwendeten Ressourcen bestehen dabei in den theoretischen Vorüberlegungen, welche durch das Protokoll erfasst wurden, aber auch in der Internetrecherche. Als Beispiel kann das Protokoll zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer herangezogen werden. Für die Berechnung der physikalischen Größe wurde die vorher behandelte Methode der Fitfunktion genutzt und alle Lernenden orientierten sich an der gegebenen Gleichung. Für die letzte Aufgabe in diesem Protokoll, also das Finden eines

Erklärungsansatzes zum Verhalten der Myonen über die Relativitätstheorie, wurden verschiedene Internetseiten als Informationsquellen genutzt. Auch in diesem Fall zeigten viele Lernende dasselbe Problemlöseverhalten, indem sie die Seite von Leifi-Physik<sup>2</sup> nutzten. Ein Grund dafür könnte die starke Einbindung von Leifi-Physik in den schulischen Physikunterricht sein, sodass Leifi-Physik den Lernenden als geeignete Informationsquelle erscheint. Einzig S5 überprüfte mehrere Quellen zur Lösung der Aufgabe. Dazu zählen ebenfalls die bereits erwähnte Seite von Leifi-Physik, aber auch verschiedene Wikipedia-Seiten. Die Evaluation des Problemlöseverhaltens wurde erneut anhand der Richtigkeit der Aufgabenlösung vorgenommen, indem diese gemeinsam verglichen wurde.

## **Zusammenfassung**

Insgesamt kann man die folgenden Schlüsse zum Problemlöseverhalten der Lernenden ziehen. Das gezeigte Problemlöseverhalten lässt sich eindeutig den einzelnen Phasen des Modells zum Problemlöseverhalten von Tallman et al. (1993) zuordnen. Das Erfassen des Problems und die Bereitwilligkeit dieses zu lösen sind quasi durch die Rahmensituation des Teaching Experiments sowie der direkten Interaktion mit der Lehrperson gegeben. Darüber hinaus kann man feststellen, dass die Menge an genutzten Ressourcen eher klein ist, jedoch sind die verwendeten Ressourcen in dem jeweiligen Aufgabenfeld angebracht und sinnvoll. Zum Beispiel umfasst die dritte Aufgabe des Diagramm-Arbeitsblattes alle wichtigen Interpretationsschritte, sodass eine weitere Recherche nicht zwingend notwendig ist.

Die Evaluation der Lösungsstrategie äußert sich in den meisten Fällen durch ein Erfragen der Meinung der Lehrperson. Das eigene Verhalten wird von den Lernenden also nicht internal, sondern external evaluiert. Der Grund dafür liegt vermutlich an der Rolle der Lehrperson im Schulunterricht. Vor allem in Übungsphasen des Physikunterrichts dient die Lehrkraft häufig zum Geben von Hilfestellungen und dem Evaluieren der Richtigkeit der Lösungen. Die Transfermöglichkeiten der Problemlösehandlungen belaufen sich dabei auf den schulischen Kontext. Bei einer gegebenen Aufgabenstellung mit klaren Vorgaben zur Untersuchung der erforderlichen Variablen, lässt sich das Verhalten gut übertragen. Dies sieht man an dem

---

<sup>2</sup> Unter dem folgenden Link abrufbar: <https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/spezielle-relativitaetstheorie/aufgabe/lebensdauer-von-myonen> (Datum des letzten Aufrufs: 07.04.24)

steigenden Grad der fachlichen Korrektheit bei den einzelnen Interpretationen. So wird das xyz-Diagramm ausführlicher und fachlich korrekter erstellt und ausgewertet als das vorher erstellte xy-Diagramm.

## **4.2 Offene Fragen**

Nach Durchführung und Auswertung der Teaching Experiments kann man feststellen, dass mehrere Fragen zum Umgang, zu den Einsatzmöglichkeiten von Cosmic@Web und zur Einbindung der Astroteilchenphysik in den Schulunterricht noch offen sind. Dieses Kapitel soll dazu dienen, einen Überblick über diese offenen Fragen zu geben sowie Ansatzpunkte zu deren Beantwortung zu skizzieren. Damit sollen die Möglichkeiten und die Wichtigkeit weiterer didaktischer Forschungsarbeiten im Bereich der Astroteilchenphysik aufgezeigt werden.

Als erstes kann die Frage gestellt werden, inwieweit sich die Astroteilchenphysik und das Arbeiten mit Cosmic@Web auf andere Jahrgangsstufen übertragen lässt. Auf den ersten Blick fallen zwei mögliche Ansatzpunkte ins Auge, wo dies möglich wäre: im Anschluss an das Behandeln der Radioaktivität in Klasse 9 (vgl. SMK (2022), S. 28) und eine Einbeziehung in das Unterrichtsfach „Astronomie“ in den Klassenstufen 11 und 12. In der Klassenstufe 9 ließe sich von der Teilchenphysik über das Einführen des Standardmodells der Elementarteilchen auf die Astroteilchenphysik überleiten. Die Tatsache, dass neben der radioaktiven Strahlung auch andere Arten der ionisierenden Teilchenstrahlung, also die kosmische Strahlung, existieren, bildet interessante Anknüpfungspunkte, indem man diese beiden Strahlungsarten beispielsweise vergleicht. An diesen Entwurf kann man die folgende Frage anführen: Wie gestalten sich die Einsatzmöglichkeiten von Cosmic@Web in der 9. Klassenstufe? Inwiefern unterscheidet sich der Einsatz des Online-Tools von den Einsatzmöglichkeiten in der 10. Klassenstufe?

In der Sekundarstufe II könnte die Überleitung ausgehend von Phänomenen der Astronomie, wie zum Beispiel Supernovae oder Sonnenwinde, auf die Astroteilchenphysik gestaltet werden. Auch hier kann die Frage nach den Einsatzmöglichkeiten gestellt werden. Mutmaßlich bestehen für diese Möglichkeit des Einsatzes gute Voraussetzungen, da die Wahl des Faches

Astronomie freiwillig ist. Dementsprechend kann mit einer hohen Interessiertheit und Motiviertheit der Schüler\*innen gerechnet werden. Darüber hinaus kann man fragen, ob der Einsatz des erweiterten Modus zur Diagrammerstellung in der Klasse 11/12 sinnvoll wäre, da sich dieser in seiner thematischen Komplexität und Tiefe eher an Abiturienten\*innen und deren Leistungsniveau richtet. Die Möglichkeit des Implementierens von Cosmic@Web in andere Jahrgangsstufen bedingt allerdings auch eine erneute Analyse des Arbeitsverhaltens beim Umgang mit Diagrammen. Je nachdem in welche Klassenstufe das Online-Tool eingebracht wird, muss unterschieden werden, inwieweit die Lernenden Kompetenzen im Bereich des sachgemäßen Umgangs mit Diagrammen besitzen bzw. diese noch erlernen müssen. Auch könnte man in jüngeren Klassenstufen das Verständnis der physikalischen Größen, die in Cosmic@Web vorgestellt und in den Diagrammen in Beziehung zueinander gesetzt werden, erforschen.

Ein Punkt, welcher in den Teaching Experiments nicht erforscht wurde, ist die Frage des Einarbeitens in das Themengebiet der Astroteilchenphysik und in Cosmic@Web durch die Lehrkräfte. Wie lässt sich die Einarbeitung in ein für die Lehrpersonen bis dahin vermutlich unbekanntes Thema möglichst einfach gestalten? Wie gut können die Potenziale von Cosmic@Web für den Unterricht durch die Lehrkräfte genutzt werden? Eine weitere Frage umfasst die Einsatzmöglichkeiten des erweiterten Diagrammerstellungsmodus. In der zehnten Klassenstufe waren dessen zahlreiche Parameter für das Erstellen etwaiger Korrektur- oder Fitfunktionen thematisch zu komplex und das fachgemäße Einarbeiten der Schüler\*innen würde den zeitlichen Rahmen der Unterrichtseinheit gewiss sprengen. Demzufolge bietet es sich an zu überprüfen, inwiefern der erweiterte Modus zum Beispiel in den Physik-Leistungskurs implementiert werden kann. Auch ein Gegenüberstellen der Vorgehensweisen zum Ermitteln der Fit-Funktionen, entweder direkt in Cosmic@Web durch den erweiterten Modus oder über den Taschenrechner, was den Lernenden bereits bekannt ist, bietet Potenzial für zukünftige Forschungen.

Die Möglichkeit der Einbindung von Cosmic@Web in einen fächerübergreifenden Unterricht kann ebenfalls diskutiert werden. Das Themengebiet der ionisierenden kosmischen Strahlung bildet Anknüpfungspunkte mit mehreren Fächern, wie zum Beispiel der Biologie oder Geographie. Zur Untersuchung der Frage, warum Piloten\*innen ein Dosimeter auf Flügen

mitführen müssen, könnte ein projektorientierter fächerverbindender Unterricht auf der Grundlage von Cosmic@Web erdacht werden. In diesem Zusammenhang kann ebenfalls die Frage nach dem Konzipieren von Flugruten untersucht werden. Also zum Beispiel warum diese Flüge bestimmte Regionen, wie die Pole, meiden. Auch die Einbeziehung geographischer Lerninhalte, wie die Entstehung des Wetters und dessen Einfluss auf die kosmische Strahlung, über das Polarstern-Experiment, welches in Cosmic@Web vertreten ist, bietet Potenzial für zukünftige Forschungen. Folglich lässt sich die groß gefasste Frage aufstellen: Inwieweit bietet Cosmic@Web Potenzial für einen fächerübergreifenden Unterricht? Welche fächerübergreifenden Lerninhalte können über die Nutzung von Cosmic@Web vermittelt werden?

### **4.3 Schlussfolgerungen für die Einbindung in den Physikunterricht**

Im folgenden Abschnitt werden die Voraussetzungen für einen sinnvollen und gewinnbringenden Einsatz von Cosmic@Web im gymnasialen Physikunterricht erläutert. Wie bereits beschrieben, fließen sowohl Erkenntnisse aus der fachlichen und didaktischen Analyse (siehe Kapitel 2) und den Teaching Experiments (siehe Kapitel 3 und Kapitel 4) in diese Diskussion mit ein. Das Ziel dieses Kapitels besteht in dem Entwickeln spezifischer Empfehlungen für das Einbinden von Cosmic@Web und der Astroteilchenphysik in die 10. Klassenstufe für Physiklehrkräfte.

Um den Einsatz des Online-Tools Cosmic@Web im Themenbereich der Astroteilchenphysik gewinnbringend gestalten zu können, wird ein wesentliches Maß an Einarbeitung der Lehrperson in die grundlegende Thematik der Astroteilchenphysik verlangt. Dies liegt daran, dass der Anreiz für das Arbeiten mit Cosmic@Web nicht in dem bloßen Erstellen der Diagramme bzw. dem Verknüpfen der unterschiedlichen physikalischen Experimentiergrößen liegt, sondern vor allem in dem Auswerten der Diagramme zum Beantworten physikalischer Fragestellungen. Das Werkzeug des Erstellens der Graphen ist also kein Selbstzweck, sondern verfolgt das übergeordnete Ziel eine Forschungsfrage / ein physikalisches Problem zu ergründen. Das Verständnis des Online-Tools, dessen Funktionsweise, die Möglichkeiten zum Erforschen wissenschaftlicher Fragestellungen, aber auch die Grenzen der

Diagrammerstellungsfunktionen können folglich nur dann vollends erfasst werden, wenn die fachliche Grundlage entsprechend vorhanden ist.

Ein weiterer zu beachtender Punkt ist der folgende. Die Schwierigkeit und der Rechercheaufwand sind je nach Experiment und Forschungsfrage / Aufgabe verschieden. Experimente, bei denen eine qualitative Beantwortung möglich ist, wie zum Beispiel die Frage nach der Ankunftsrichtung der Myonen, lassen sich in der Regel einfacher und schneller beantworten als Fragestellungen, die quantitativ erforscht werden müssen, wie beispielsweise das Ermitteln der mittleren Lebensdauer von Myonen über eine Fitfunktion. Durch das Anleiten der Lernenden über gezielte und klar strukturierte Aufgaben, wie im Protokoll zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer kann dieser Effekt jedoch abgemildert werden.

Damit also die Physiklehrkraft mit akzeptablem Arbeitsaufwand einschätzen kann, ob Cosmic@Web zum Untersuchen einer bestimmten Forschungsfrage geeignet ist und die in diesem Zusammenhang erstellten Diagramme ein sinnvolles Arbeitswerkzeug für die Lernenden darstellen, sollten die Möglichkeiten, Funktionen und Probleme des Online Tools bekannt sein. Dieser Punkt beinhaltet gleichzeitig auch ein Problem für eine Einbindung von Cosmic@Web in den Physikunterricht, da das Tutorial zur Diagrammerstellung in Cosmic@Web nur einen groben Überblick über die verschiedenen Werkzeuge und Parameter gibt. Der erweiterte Diagrammerstellungsmodus wird zwar im Tutorial erwähnt, seine Möglichkeiten zum Erstellen von Korrektur- und Fitfunktionen werden aber nicht erörtert. Daraus folgt, dass wesentliche Tools, die im erweiterten Modus vorhanden sind, erst recherchiert werden müssen. Ähnlich gestaltet sich die Suche nach geeigneten Experimenten/ Aufgabenstellungen für Experimente. In der Fachliteratur wird der Einsatz von Cosmic@Web zwar beschrieben, jedoch mangelt es an konkreten Materialien, zum Beispiel an Video-Tutorials oder vorbereiteten Arbeitsblättern sowie Protokollen. Die Einarbeitung in Cosmic@Web erfolgt deshalb meist anhand der Beispieldiagramme, welche auf der Internetseite von DESY aufgeführt sind oder über beschriebene Diagramme, wie im Fall dieser Arbeit, die bereits mit Lernenden erprobt wurden. Vorhandene und didaktisch ansprechende Arbeitsmaterialien, die neben den Funktionen zur Diagrammerstellung auch mögliche Wege



zur Diagrammauswertung skizzieren, würden die Einarbeitung in dieses Themengebiet wesentlich vereinfachen.

Darüber hinaus lassen sich anhand der durchgeführten Teaching Experiments und der didaktischen Analyse von Cosmic@Web noch andere Gelingensbedingungen für das Einbringen von Cosmic@Web in den Physikunterricht herleiten. Besonders zu Beginn der Einbindung von Cosmic@Web sollten ausreichend Erklärungen und Hilfestellungen zum zielgerichteten Arbeiten mit dem Online-Tool gegeben werden. Gründe hierfür sind einerseits die Komplexität der fachlichen Inhalte der Astroteilchenphysik und andererseits die vielfältigen Möglichkeiten der Kombination der unterschiedlichen physikalischen Größen. Beispielsweise konnte in den Teaching Experiments festgestellt werden, dass es bezüglich mehrerer Einheiten Verständnisprobleme gab, die durch Hilfestellungen des Autors beseitigt werden konnten. Meist handelte es sich um die verschiedenen Zeiteinheiten: *delta\_t*, *time* und *ymdh*, die jedoch unterschiedliche Größen darstellen, was den Teilnehmenden nicht immer bewusst war. Auch die Angabe der Zeit in  $10^6$  s stellt ein Problem für die Interpretation von Diagrammen mit dem einfachen Modus dar. Folglich sollten Erklärungen zu den physikalischen Größen beigefügt werden oder aber ein entsprechender Hinweis auf die Datensatzbeschreibung, welche in Cosmic@Web vorliegt.

Anhand der von Schwerdt et al. (2020) vorgestellten Projektwoche zu kosmischen Teilchen lässt sich ableiten, dass die Sozialformen Partnerarbeit und / oder Gruppenarbeit für das Arbeiten mit Cosmic@Web von Vorteil sind. Das Kommunizieren innerhalb der Lernendengruppe, das gegenseitige Geben von Hinweisen oder das gemeinsame Bewältigen von Schwierigkeiten führt dazu, dass einerseits Kompetenzen im Bereich der Kommunikation fortgebildet werden, aber auch, dass die Gruppe schneller zur richtigen Beantwortung der Aufgabenstellung gelangt. In den Teaching Experiments konnten individuelle Unsicherheiten der Teilnehmer\*innen beobachtet werden.

Zum Beispiel war sich Schüler\*in 6 unsicher bezüglich der Wahl der abhängigen bzw. unabhängigen Variable im Protokoll „Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen“. Auch wurden verschiedene Diagrammtypen, zum Beispiel von den Schülern\*innen 3 und 4, für das Ermitteln der mittleren Lebensdauer vorgeschlagen. Diese Unsicherheiten können durch eine

Gruppenarbeit und den gegenseitigen Austausch der Lernenden untereinander behoben und zum Teil kompensiert werden. Im Falle des Konzipierens einer Leistungserhebung bzw. nach dem gemeinsamen Einarbeiten in die unterschiedlichen Funktionen des Online-Tools können diese nach der Einarbeitungsphase auch in Einzelarbeit stattfinden.

Ein letzter Punkt, der betrachtet werden kann, sind die technischen Voraussetzungen, die für das Arbeiten mit Cosmic@Web erfüllt sein müssen. Zum einen bietet es sich an, den Google-Chrome-Internetbrowser zu verwenden. Im Rahmen der Teaching Experiments wurde festgestellt, dass Cosmic@Web bei Verwendung über den Browser Safari nur eingeschränkt genutzt werden konnte. Beispielsweise konnte das Tutorial für den Diagrammerstellungsmodus nicht geladen werden oder die verschiedenen Parameter zur Erstellung der Diagramme konnten nicht ausgewählt werden.

Ein Hinweis, der ebenfalls an dieser Stelle angebracht ist, beleuchtet eine weitere Voraussetzung für einen zielgerichteten und flüssigen Arbeitsprozess. Es bietet sich bei Verwendung von Cosmic@Web an, mehrere Internet-Tabs zu nutzen, von denen ein Tab durch den Diagrammerstellungsmodus belegt ist. Die weiteren Tabs können dabei für weitere Recherchen oder zur Visualisierung der Datensatzbeschreibung genutzt werden. Bei Verwendung eines einzelnen Tabs ergibt sich häufig die Situation, dass der Diagrammerstellungsmodus immer wieder geöffnet und für eine Recherche geschlossen werden muss, was den Arbeitsprozess verlangsamt und den Arbeitsfluss stört. Hinweise dieser Art können durch die Lehrperson im Rahmen der Einführung von Cosmic@Web gegeben werden. Je nach technischen Voraussetzungen, die im Klassenzimmer bestehen, ist es zusätzlich ratsam, das Tutorial gemeinsam durchzuführen. So kann die Lehrkraft beispielsweise die Tutorialsschritte an einem Smartboard vorführen, falls die Lernenden Unverständnis bezüglich der Handhabung zeigen. Dadurch können Fehlvorstellungen zeitig eliminiert werden, sodass die darauffolgende Arbeitsphase einen größeren Lernfortschritt bewirkt.

Zum Abschluss dieses Kapitels sind die wichtigsten Bedingungen für einen gewinnbringenden Einsatz von Cosmic@Web im Physikunterricht noch einmal stichpunktartig aufgeführt:

- Einarbeitung in das Themengebiet der Astroteilchenphysik sowie in die Funktionen und Möglichkeiten von Cosmic@Web durch die Lehrkraft als essentielle Voraussetzung
- falls als Projekt- oder Schüler\*innenaktivität konzipiert:
  - Erlernen des Umgangs mit Cosmic@Web in Partner- oder Gruppenarbeit
  - zu Beginn: Geben von Hilfestellungen durch die Lehrperson
  - inhaltlicher Fokus auf das Beantworten wissenschaftlicher Fragestellungen (Motivation der Lernenden liegt in dem Ergründen des Universums)
  - Fokus auf wissenschaftlichem Arbeitsprozess (Lernende finden die Arbeit als Physiker\*in spannend und interessant)
- Verzicht auf den erweiterten Modus in Klassenstufe 10
  - komplexe Diagrammerstellungsfunktionen des Online-Tools führen zu keiner optimalen Passung zwischen Anforderung und Leistungsniveau der Lernenden
  - fehlende Zeit im Unterricht
- technische Voraussetzungen:
  - Einsatz an Computern über den Google-Chrome-Browser
  - ggf. Visualisierung der Tutorialschritte an elektrischer Tafel
  - Nutzen mehrerer Internettabs für den Diagrammerstellungsmodus und zur Recherche

## **5 Unterrichtskonzept**

Auf Basis der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Erkenntnisse und Grundlagen wird nun das sechs Schulstunden umfassende Unterrichtskonzept vorgestellt. Dabei werden für jede der drei Doppelstunden grundlegende Gedanken zur Umsetzung, Lernziele sowie eine Verlaufsplanung beschrieben.

### **5.1 Erste Doppelstunde: Grundlagen der Astroteilchenphysik**

Die erste der drei Doppelstunden, welche den Themenkomplex der Astroteilchenphysik an die Schüler\*innen vermitteln sollen, verfolgt das Ziel, die Astroteilchenphysik einzuführen. Darüber hinaus soll die für die Lernenden wahrscheinlich unbekannte Wissenschaft in das Denkgebäude der Physik eingeordnet und deren Forschungsgegenstand, die kosmische Strahlung, beschrieben werden. Die grundlegende Struktur dieser ersten Doppelstunde gleicht dabei in groben Zügen der ersten Sitzung der Teaching Experiments. Die in den Teaching Experiments verwendeten Arbeitsmaterialien, also die Arbeitsblätter, Protokolle sowie die Power-Point Präsentation (siehe Anhang A.3) wurde überarbeitet. Die für das Unterrichtskonzept überarbeiteten Versionen sind im Anhang A.9 und A.10 dargestellt.

#### **Lernziele**

Das Formulieren der Lernziele erfolgt auf Grundlage der in den Bildungsstandards beschriebenen Kompetenzen (vgl. KMK (2020)) und baut auf den für die Teaching Experiments beschriebenen Lernzielen auf. Für die erste Doppelstunde ergeben sich die folgenden kompetenzorientierten Lernziele.

- S1 Die Lernenden erklären Beispiele zum Wirken der fundamentalen Kräfte über das Standardmodell der Elementarteilchen.
- K1 Die Lernenden recherchieren zu den Wechselwirkungen in digitalen Medien und wählen zum Beantworten der Aufgabe geeignete Quellen aus.
- K3 Die Lernenden entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens zur Lösung der Arbeitsaufträge geeignete Informationen aus einem story-telling-Text.

Das Erfüllen der Lernziele kann dabei über das Bearbeiten der Arbeitsaufgaben beobachtet werden. Die Kompetenzen S1 und K1 werden über die Gruppenarbeit zu den vier fundamentalen Wechselwirkungen gefördert, bei denen die Lernenden selbstständig digitale Quellen zur Charakterisierung einer Wechselwirkung evaluieren und diese Wechselwirkung anhand geeigneter Beispiele veranschaulichen. Die Kompetenz K3 wird im zweiten Teil der Unterrichtsstunde gefördert. In der Übungsphase müssen die Lernenden Informationen zum Lösen der ersten Aufgabe des Arbeitsblattes zur kosmischen Strahlung aus einem story-telling Text herausarbeiten. Anhand der Richtigkeit der Arbeitsaufgaben kann das Erreichen des Lernzieles eingeschätzt werden.

### **Design der ersten Doppelstunde**

Der Einstieg in das Themengebiet der Astroteilchenphysik wird anhand einer Einstiegsfrage vollzogen, welche die Lernenden motivieren soll. Die Frage lautet: „Warum müssen Pilot\*innen auf Flügen stets ein Dosimeter mit sich führen?“ Die den Lernenden bekannte Situation eines Fluges wird mit einem Problem (der noch unbeantworteten Fragestellung) und dem neuen Themengebiet verknüpft. Dies aktiviert die Schüler\*innen und weckt deren Interesse. Diese erhalten den Auftrag, ggf. mit dem Smartphone selbstständig zu recherchieren und sich dann nach dem Think-Pair-Share Prinzip mit ihrem\*r Banknachbarn\*in auszutauschen. Die Ergebnisse werden anschließend im Plenum zusammengetragen. Es wird darauf hingewiesen, dass die kosmische Strahlung und deren ionisierende Wirkung den Grund für die gesundheitliche Gefährdung bei längerer Bestrahlungsdauer bilden. Um das gesundheitliche Risiko bestmöglich einschätzen zu können, müssen Piloten\*innen Dosimeter mitführen. Diese Methode birgt den Vorteil, dass auch weniger aktive Schüler\*innen sich mit der Einstiegsfrage beschäftigen. Schon in der Anfangsphase wird die Rolle der Astroteilchenphysik als problemlösende Wissenschaft betont. Auch die Schülervorstellung, dass alle Arten von Strahlung gefährlich seien (siehe Kapitel 2.1.3), wird über diese Aufgabe gelöst, da die Lösung der Frage auf dem Einschätzen und dem verantwortungsvollen Umgang mit der Strahlung liegt. Zur Überleitung in die Erarbeitungsphase skizziert die Lehrkraft den Jugendlichen die Grobstruktur der Unterrichtseinheit und deren thematische Schwerpunkte.

Die Erarbeitungsphase folgt dabei ungefähr dem strukturellen Ablauf der ersten thematischen Einheit der Akzeptanzbefragungen. Im Unterrichtsgespräch erarbeitet die Lehrkraft gemeinsam mit den Lernenden die Grobziele der Physik anhand der vier Forschungsfragen. Anschließend werden die drei Wissenschaften Astronomie, Kosmologie und Teilchenphysik als fachliche Grundlage der Astroteilchenphysik präsentiert, man knüpft also direkt an den bereits im Lernbereich 3 behandelten und damit den Lernenden vertrauten Themenkomplex der Astronomie (vgl. SMK (2022), S. 31) an. Im Unterrichtsgespräch werden anhand von Entdeckungen und Modellen die fachlichen Grundlagen erörtert sowie die Längenskalen, auf denen die drei Wissenschaften arbeiten. Im Anschluss erfolgt das Bearbeiten von Aufgabe 1 des ersten Arbeitsblattes in Partnerarbeit. Der anschließende Vergleich erfolgt im Plenum.

Nachdem ausgehend von Vorkenntnissen aus der Chemie und der Physik der Begriff der Quarks, als elementare Bausteine der Materie, eingeführt wird, dient das Unterrichtsgespräch dem gemeinsamen Erarbeiten der Grundaussagen des Standardmodells der Elementarteilchen. Um die Lernenden zu aktivieren, erfolgt im Anschluss eine Gruppenarbeit bei der jeweils eine Wechselwirkung von einer Lernendengruppe erarbeitet wird. Punkte, die von den Schülern\*innen recherchiert werden sollen, sind das zur Wechselwirkung gehörige Botenteilchen, die Ladung sowie mindestens zwei Beispiele, die sich über diese fundamentale Kraft erklären lassen. Über die Beispiele wird erneut die Bedeutung und der mögliche Alltagsbezug dieses physikalischen Modells betont. Anschließend erfolgt eine weitere Übung zu den eben vermittelten Lerninhalten über das Bearbeiten der Aufgaben 2 und 3 des ersten Arbeitsblattes. Aufgabe 3 wurde dabei um einen weiteren Aufgabenparameter ergänzt. Neben dem bloßen Zuordnen der Begriffe sollen die Lernenden die gewählte Zuordnung begründen. Dies dient zum Anregen und zum selbstständigen Abgleichen der aufgeführten Beispiele mit den in der Gruppenarbeit erarbeiteten Beispielen.

Den zweiten großen inhaltlichen Part bilden die Einführung und die Erarbeitung wesentlicher Merkmale der kosmischen Strahlung. Diese Unterrichtsphase wird anhand der story-telling Methode, also durch die Person des Wissenschaftlers, aufgebaut. Die Lernenden versetzen sich durch eine aus der Sicht von Victor Hess geschriebene Geschichte (siehe Anhang A.10) in die Person des Wissenschaftlers und lösen selbstständig mit dem vom Autor verfassten Text die Aufgabe 1 des zweiten Arbeitsblattes. Zur Sicherung der Lerninhalte wird ebenfalls die

Think-Pair-Share Methode angewendet. Diese Sozialform soll alle Schüler\*innen dazu anregen, die neuen physikalischen Inhalte zusammenzufassen. Die Lernenden erhalten die Hausaufgabe, sich mit modernen Nachweismethoden und -instrumenten für die kosmische Strahlung, also mit der zweiten Aufgabe des Arbeitsblattes zur kosmischen Strahlung, zu befassen. Dies dient zum einen dem Verbessern der Recherchefähigkeiten, vor allem in dem Kontext des Arbeitens mit Cosmic@Web in den anderen Doppelstunden, zum anderen sorgt die Hausaufgabe aber auch für das Einsparen von Zeit in der zweiten Doppelstunde.

Beim Design der ersten Unterrichtsstunde wurde sich stark an den beiden ersten thematischen Einheiten des Teaching Experiments orientiert. Dies liegt vor allem daran, dass die Mehrheit der Lernenden anhand dieser zwei Einheiten ihre Concept-Maps aufbauten und strukturierten. Weitere Gründe sind, dass das Behandeln des Standardmodells der Elementarteilchen wichtige Grundlagen für eine fachlich korrekte Vorstellung der Myonen und deren Eigenschaften legt. Designprinzipien, anhand derer die Unterrichtsstunde durchdacht und strukturiert wurde, stammen dabei im Wesentlichen aus Meyers (2006) 10 Merkmalen guten Unterrichts, besonders die Methodenvielfalt, welche sich durch die unterschiedlichen Inszenierungstechniken (vgl. Meyer (2006), S. 76) sowie unterschiedliche Sozialformen während der Übungsphasen äußert. Auch wurde auf eine klare Strukturierung der Unterrichtsstunde, welches sich durch Prozess- und Rollenklarheit äußert (vgl. Meyer, 2006, S. 76), geachtet.

Die inhaltliche Klarheit und die damit verbundene Plausibilität des theoretischen Gangs (vgl. Meyer (2006), S. 76) werden durch die Einordnung der Astroteilchenphysik in das physikalische Denkgebäude und über das Erörtern der drei grundlegenden Wissenschaften erreicht. Der Grund hierfür liegt in der Strukturierung der Concept-Maps, die nach Ende der Akzeptanzbefragungen durch die Lernenden erstellt wurden. Die Mehrheit dieser Concept-Maps nutzte diese Struktur zur Aufbereitung und Darstellung der fachlichen Inhalte. Um die für den Umgang mit digitalen Medien benötigten Kompetenzen zu stärken, da diese im weiteren Verlauf der Unterrichtseinheit und besonders beim Arbeiten mit Cosmic@Web einen wichtigen Gelingensfaktor darstellen, werden schon in dieser ersten Doppelstunde mehrere Rechercheaufgaben an die Lernenden erteilt.

## Verlaufsplanung:

### 1. Doppelstunde (90 Minuten) – Thema: Einführung in die Astroteilchenphysik

Zeit	Phase	Unterrichtsschritte	Sozialform/ Handlungsmuster	Materialen	Anmerkungen
5'	Begrüßung  Einstieg	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lehrer begrüßt Schüler*innen</li> <li>- Einstiegsfrage/Motivation: Dosimeter bei Piloten*innen „Warum müssen Piloten*innen stets ein Dosimeter auf Flügen mit sich führen?“</li> <li>- zur Beantwortung der Frage tauschen sich SuS in Think Pair Share Prinzip aus (zum Recherchieren ist Smartphone erlaubt)</li> <li>- Einholen der Antworten durch Lehrkraft im Plenum → Grund: kosmische Strahlung und deren ionisierende Wirkung</li> <li>- Bekanntgabe des Ziels und des groben Ablaufs der Doppelstunde → Untersuchung der kosmischen Strahlung und deren Eigenschaften → Astroteilchenphysik als physikalische Disziplin, welche die kosmische Strahlung erforscht</li> </ul>	Lehrervortrag   Think, Pair, Share   Unterrichtsgespräch (UG)  Lehrervortrag (LV)	Power Point Präsentation (Folie 1,2)  (ggf. Dosimeter falls vorhanden)	Betonung auf Erfolg der Dosimeter Strahlung ist zwar nicht ungefährlich, doch man kann die Wirkung abschätzen
15'	Erarbeitung I	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lehrer präsentiert Astroteilchenphysik als modernes Teilgebiet der Physik, welches die großen Fragen der Physik beantworten will</li> <li>- Einordnen der Astroteilchenphysik in „Großes physikalisches Denkgebäude“</li> <li>- Anknüpfungspunkte zu bereits bekannten Wissenschaften finden,</li> <li>- dafür Analyse des Namens „Astroteilchenphysik“</li> </ul> Partnerarbeit: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erarbeiten der drei grundlegenden Disziplinen Astronomie, Kosmologie und Teilchenphysik</li> <li>- Lösen der Aufgabe 1 auf Arbeitsblatt 1</li> </ul>	UG          Partnerarbeit (PA)          UG	Power Point Präsentation (Folien 3-6)       Arbeitsblatt 1	





18'	Erarbeitung IV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse zur Astroteilchenphysik durch die Lehrperson</li> <li>- Kosmische Strahlung wird über story-telling aus Sicht von Victor Hess erarbeitet (Entdeckung, Nachweis im 20. Jahrhundert, Nebelkammer, Bestandteile)</li> <li>- dafür Lösen der Aufgabe 1 des zweiten Arbeitsblattes in Einzelarbeit</li> <li>- Vergleich der Lösungen im Plenum</li> </ul>	LV  UG  EA  Plenum	Power-Point Präsentation (Folien 18,19) (Folien 20-23)  Arbeitsblatt 2 story-telling Text	
2'	Sicherung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusammenfassung der Lerninhalte durch die Lernenden (Think Pair Share)</li> <li>- Ausblick auf nächste Doppelstunde</li> </ul>	Think-Pair-Share LV		
	Hausaufgabe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hausaufgabe: Lösen der Aufgabe 2 des 2. Arbeitsblattes</li> <li>- Recherchieren zum Thema Szintillatoren und Tscherenkow-Effekt</li> </ul>		Arbeitsblatt 2 Technisches Endgerät für Recherche  Power-Point Präsentation (Folien 24)	

## 5.2 Zweite Doppelstunde: Einführung in Cosmic@Web

Nachdem in der ersten Doppelstunde die Grundlagen der Astroteilchenphysik gelegt wurden, sollen diese in der zweiten Doppelstunde über das Behandeln der kosmischen Strahlung erweitert werden. Diese Unterrichtsstunde beinhaltet zudem den Einstieg in das Online-Tool Cosmic@Web, welches den Lernenden zur Erforschung der Eigenschaften der kosmischen Strahlung dient.

### Lernziele

- S4 Die Lernenden führen mit der Diagrammerstellungsfunktion von Cosmic@Web Experimente nach Anleitung durch, protokollieren dabei durch das Beantworten der Protokollaufgaben ihre theoretischen Vorüberlegungen und den Versuchsaufbau und werten den Versuch durch die Interpretation der erstellten Diagramme aus.
- E4 Die Lernenden modellieren die Abhängigkeit der mit der CosMO-Mühle gemessenen Myonenrate vom Einfallswinkel bzw. von der Temperatur unter Zuhilfenahme des Online-Tools Cosmic@Web und dessen Diagrammerstellungsmodus.
- E4 Die Lernenden modellieren die Verteilung der im LiDO-Experiment gemessenen absoluten Häufigkeiten der Zeitdifferenzen unter Zuhilfenahme des Online-Tools Cosmic@Web und dessen Diagrammerstellungsmodus.
- K1 Die Lernenden recherchieren zu den in den Protokollen beschriebenen Sachverhalten zielgerichtet in digitalen Medien und wählen für die Bearbeitung der Protokolle passende Quellen aus.

Die Lernzielkontrolle erfolgt über das Beobachten der Gruppenarbeit in der dritten Phase der Unterrichtsstunde. Anhand des Arbeitsverhaltens beim Lösen der Protokollaufgaben kann das Erreichen der Lernziele eingeschätzt werden. Ein weiterer Ansatzpunkt zur Evaluation besteht in der fachlichen Korrektheit der Antworten auf die Protokollaufgaben.

## Design der zweiten Doppelstunde

Zu Beginn der zweiten Doppelstunde werden die fachlichen Inhalte, welche in der ersten Unterrichtsstunde erarbeitet wurden, durch die Verwendung von „Learning Snacks“ wiederholt. Das Quiz (siehe Anhang A.10) wurde dabei vom Autor erstellt und dient dem Wiederholen der Grundaussagen des Standardmodells der Elementarteilchen und der kosmischen Strahlung. Im Anschluss werden die Rechercheergebnisse der Schüler\*innen verglichen und es wird anhand dieses Vergleichs zum Auger-Observatorium und dem Nachweis von Myonen über den Tscherenkow-Effekt übergeleitet. Im Unterrichtsgespräch werden gemeinsam mit den Lernenden die wichtigsten Kernpunkte herausgearbeitet, welches den Abschluss der theoriegebundenen Phase der Unterrichtseinheit darstellt.

An diesem Punkt wird die Motivation der Lernenden durch die Ankündigung geweckt, die Eigenschaften der Myonen nun selbst zu erforschen. Cosmic@Web wird als Forschungswerkzeug zur Durchführung dieses wissenschaftlichen Arbeitsprozesses eingeführt. Über das Lesen des Einführungstextes (vgl. DESY-Cosmic@Web) erhalten die Schüler\*innen einen ersten Eindruck über das breite Anwendungspotenzial von Cosmic@Web durch das Erforschen verschiedener Experimente mit unterschiedlichen Fragestellungen. Gegebenenfalls kann zum Einstieg auch das Erklärvideo verwendet werden, aus zeitlichen Gründen wurde an dieser Stelle darauf verzichtet. Die im Video gegebenen Erklärungen können ebenfalls durch die Lehrperson an die Lernenden kommuniziert werden. Das Tutorial wird daraufhin von allen Jugendlichen an deren technischen Endgeräten und von der Lehrkraft an einer elektrischen Tafel simultan durchgeführt. Die Lernenden sind dazu angehalten bei Unverständnis und aufkommenden Fragen sofort die Lehrperson zu informieren, damit diese behoben werden können.

Die nun folgende Instruktionsphase bildet die Grundlage für die anschließende Arbeitsphase. Der\*die Lehrer\*in kommuniziert die folgenden Instruktionen an die Schüler\*innen. Alle Lernenden sollen sich in insgesamt vier Gruppen einteilen. Jeweils zwei Gruppen bearbeiten jeweils ein Protokoll, d.h. die Hälfte aller Schüler\*innen bearbeitet das Protokoll zur Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen, die andere Hälfte bearbeitet das Protokoll zum Bestimmen der mittleren Lebensdauer von Myonen. Die Lernenden sollen alle

Protokollaufgaben in Gruppenarbeit und unter Einsatz von Cosmic@Web und des Internets lösen. Als Hilfestellung dient dabei einerseits das Arbeitsblatt zum Arbeiten mit Diagrammen, welches von den Lernenden bearbeitet werden kann, um ein besseres Verständnis für die verschiedenen Diagrammtypen in Cosmic@Web zu erhalten, und andererseits die Informationsseiten von Cosmic@Web, welche einen Überblick über die verschiedenen Experimente, deren Versuchsaufbau und Messprinzip gibt.

Am Ende der Arbeitsphase, in der dritten Doppelstunde, erfolgt die Präsentation der Ergebnisse in Form eines fünfzehnminütigen Vortrags. Dabei sollen in den ersten fünf Minuten die theoretischen Vorüberlegungen, der Versuchsaufbau und das Messprinzip erörtert werden. In den nächsten fünf Minuten sollen die mit Cosmic@Web erstellten Diagramme präsentiert und ausgewertet werden, dabei sollen sich die Lernenden an den Antworten der Protokollaufgaben orientieren. Den Abschluss der Präsentation bildet eine fünfminütige Diskussion, in der andere Lernende Fragen stellen und Feedback zum Arbeitsprozess in der Gruppe geben können. Wichtig dabei ist, dass jeweils eine Gruppe die theoretischen Vorüberlegungen des Experiments und die andere Gruppe die erstellten Diagramme erörtert. Die Gruppen erfahren jedoch im Vorhinein nicht welche Gruppe welchen Vortragsteil vorstellen soll, sodass alle Gruppen alle Aufgaben bearbeiten müssen. Die restliche Zeit der zweiten Doppelstunde kann für das Einarbeiten in Cosmic@Web und in die Protokollaufgaben genutzt werden. Die Lehrperson steht für Fragen und eventuelle Hilfestellungen zur Verfügung, sie gibt aber nicht sofort die richtige Lösung zu einer Aufgabe an, sondern lediglich Hinweise, die beim selbstständigen Beantworten der Aufgabe dienlich sein könnten.

Von den 10 Merkmalen guten Unterrichts (vgl. Meyer (2006)) wird in dieser Doppelstunde besonders die inhaltliche Klarheit als Designgrundsatz verwendet. Der Übergang in die Arbeitsphase erfolgt anhand des Gebens der oben beschriebenen Aufgabenstellung an die Lernenden. Diese ist dabei so umfangreich, dass bei deren Formulierung klar Aufgabenbereiche abgegrenzt werden müssen, welche die Lernenden nacheinander abarbeiten. Die Verständlichkeit der Aufgabenstellung (vgl. Meyer (2006), S. 78) wird dabei besonders geachtet, indem nach der Instruktion durch die Lehrkraft die Rückfrage gestellt wird, ob es Unklarheiten bzw. Unsicherheit bezüglich der Arbeitsaufträge gibt. Auch das klare

Kommunizieren der Ergebnissicherung (vgl. Meyer (2006), S. 78) über den Vortrag am Ende der dritten Doppelstunde ordnet Meyer (2006) diesem Merkmal zu.

Schülervorstellungen, welche die Lernenden durch die zweite Doppelstunde überwinden können, beziehen sich dabei vor allem auf das Arbeiten mit Diagrammen und auf das wissenschaftliche Arbeiten / Experimentieren. Die Vorstellung, dass es bei einer „vollkommen richtigen“ Messung keinerlei Messfehler gäbe, kann zum Beispiel sehr einfach überwunden werden, indem die Lehrperson in Cosmic@Web bei einem ausgewählten Experiment verschiedene Datensätze auswählt und als denselben Diagrammtypen plotten lässt. Beispielsweise könnte der Verlauf der gemessenen Myonenrate über die verschiedenen Zeiträume im Polarsternexperiment, welches auch im Tutorial behandelt wird, gezeigt werden. Dadurch wird ersichtlich, dass die Myonenrate von mehreren zum Teil unsystematischen Einflüssen, wie zum Beispiel dem Wetter, abhängt. Darüber kann man begründen, dass es bei jeder Messungen Messunsicherheiten gibt, die Aufgabe eines\*er Wissenschaftlers\*in besteht deshalb darin, diese Messunsicherheiten zu ergründen und deren Einfluss auf das Messergebnis abzuschätzen.

Über die gegebenen Hilfsmittel, also das Arbeitsblatt zum Arbeiten mit Diagrammen sowie die Cosmic@Web-Datensatzbeschreibung, können die Lernenden selbstständig und ggf. mit Hilfe der Lehrperson ein besseres Verständnis der Diagrammtypen und der -variablen erlangen. Dies führt zu dem Überwinden der Lernschwierigkeit, bei der Schüler\*innen die Variablen anhand ihrer Eigenschaften „abhängig“ und „unabhängig“ den Achsen nicht eindeutig zuordnen können. Auch durch die gewählte Sozialform der Gruppenarbeit, bei der sich die Jugendlichen intensiv miteinander austauschen und beraten dürfen, dient zum Überwinden dieser Lernschwierigkeit.

## Verlaufsplanung:

### 2. Doppelstunde (90 Minuten) – Thema: Einführung in Cosmic@Web

Zeit	Phase	Unterrichtsschritte	Sozialform/ Handlungsmuster	Materialien	Anmerkungen
	Begrüßung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lehrer begrüßt Schüler*innen</li> <li>- Bekanntgabe des Ablaufs dieser Doppelstunde</li> </ul>	LV	Power-Point Präsentation (Folie 25)	
5'	Wiederholung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lehrer und Schüler wiederholen die Lerninhalte der letzten Unterrichtsstunde mittels Learning Snacks</li> <li>- Internetlink: <a href="https://www.learningsnacks.de/#/welcome?userid=117622&amp;channel=Learning%20Snacks">https://www.learningsnacks.de/#/welcome?userid=117622&amp;channel=Learning%20Snacks</a></li> <li>- dabei mündliche Abfrage der Antwortmöglichkeiten bei den Lernenden</li> </ul>	UG	Learning Snacks (technische Endgerät für SuS) Power-Point Präsentation (Folie 26)	Ggf. können die Learning Snacks über die elektrische Tafel abgespielt werden. Die Lernenden geben Antworten durch Melden
20'	Sicherung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusammenfassung der bisherigen Inhalte zur kosmischen Strahlung durch die Lehrperson</li> <li>- Erarbeitung der Nachweismethoden für kosmische Strahlung am Beispiel der Nebelkammer und des Auger Observatoriums</li> <li>- dabei Vergleich der Ergebnisse der Hausaufgabe</li> <li>- Lehrer gibt Gelegenheit für das Stellen von Rückfragen</li> </ul>	LV  UG	Power-Point Präsentation (Folien 27-30) (Folien 31-37)	
10'	Erarbeitung II	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Überleitung zum Experimentierteil: „Da nun die theoretische Grundlage gelegt wurde, werden wir nun dazu übergehen, wie echte Wissenschaftler*innen die kosmische Strahlung zu erforschen.“</li> <li>- Einführung von Cosmic@Web durch Informationstext</li> <li>- gemeinsames Absolvieren des Tutorials (Lehrer an elektrischer Tafel, SuS an den technischen Endgeräten)</li> <li>- Hinweis seitens der Lehrperson: Schüler*innen sollen sich Notizen zum Tutorial machen</li> </ul>	LV	Power-Point Präsentation (Folien 38-40)	

		- während Tutorial geht Lehrkraft auf eventuelle Schülerprobleme ein			
5'	Instruktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lehrer*in teilt die Klasse in insgesamt vier Gruppen ein</li> <li>- zwei Gruppen ( je Gruppe ca. 5-6 Schüler*innen) bearbeiten Protokoll zur Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen</li> <li>- die anderen beiden Gruppen bearbeiten das Protokoll zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer</li> <li>- Beschreibung des weiteren Verlaufs durch die Lehrperson</li> <li>- Schüler*innen haben die restliche Stunde sowie die ersten 60 Minuten der dritten Doppelstunde Zeit für die Bearbeitung der Protokolle und Vorbereitung eines Vortrags, der die Lösungen der Protokollaufgaben beinhalten soll</li> <li>- Verweis auf folgende Hilfsmittel durch die Lehrkraft:</li> <li>- Arbeitsblatt 3: Arbeiten mit Diagrammen (Vergleich während der Arbeitsphase mit Musterlösung möglich)</li> <li>- technische Endgeräte, wie Smartphone, Computer, Tablet o.ä. zum Erstellen der Diagramme in Cosmic@Web</li> <li>- Nutzen der Experimente-Datenbank in Cosmic@Web</li> <li>- freie Recherche im Internet ebenfalls möglich</li> </ul>	LV	Power-Point Präsentation (Folien 41, 42)	Lernende müssen in dieser Phase besonders aufmerksam sein, ggf. Lernende dazu auffordern die Aufgabenstellung zu paraphrasieren
50'	Übung III	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schüler*innen bearbeiten die Aufgabenstellung in ihren jeweiligen Gruppen</li> <li>- Organisation und Zuteilung/Arbeitsstrategien können dabei von der Gruppe frei gewählt werden</li> <li>- Schüler*innen dürfen sich bei Fragen an die Lehrperson wenden/bekommen Gelegenheit zum Fragen stellen</li> </ul> <p>Rolle der Lehrperson</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- allgemein stiller Beobachter, d.h. Lehrkraft wird nur durch Aufforderung seitens der Lernenden aktiv (z.B. bei Fragen, Unklarheiten, zum Vergleich von Musterlösungen etc.)</li> <li>- Lehrperson weist Schüler*innen ggf. auf Besonderheiten des Protokolls hin</li> <li>- Schaffen eines lernförderlichen Klimas durch Kontrollieren des Einhaltens eines freundlichen und konstruktiven Umgangs der Lernenden untereinander</li> <li>- bei Aktivierung der Lehrperson durch Schüler*innen:</li> <li>- Lehrperson gibt Hilfestellungen, nimmt die Lösung der Aufgabe jedoch nicht vorweg</li> </ul>	GU	Protokolle Power-Point Präsentation (Folien 44-49) als Musterlösung	Power-Point Präsentation, Folie 50 enthält das Bild von Albert Einstein, dient als Hinweis zum Bearbeiten der letzten Protokollaufgabe des Protokolls Bestimmung der mittleren Lebensdauer



	Verabschiedung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verabschiedung der Schüler*innen durch Lehrkraft</li> <li>- ggf. Ausblick auf nächste Stunde, d.h. auf die Arbeitsphase und die am Ende stattfindenden Lernprodukte/Vorträge</li> </ul>	LV		
--	----------------	--	----	--	--

### **5.3 Dritte Doppelstunde: Arbeiten mit Cosmic@Web**

Die dritte und abschließende Doppelstunde dieser Unterrichtseinheit dient als Darstellung eines wissenschaftlichen Forschungsprozesses für die Lernenden. Im Zentrum stehen dabei die Bearbeitung der Protokolle sowie eine fünfzehnminütige Präsentation der Untersuchungsergebnisse.

#### **Lernziele**

- S2 Die Lernenden erläutern den Gültigkeitsbereich der klassischen Physik zur Beschreibung von Objekten über die relativistische Beschreibung des Myons im Zusammenhang mit dessen Geschwindigkeit.
- K6 Die Lernenden veranschaulichen die Lösungen der Protokollaufgaben in ziel-, sach- und adressatengerechten Darstellungsformen, d.h. in Form einer Power-Point-Präsentation oder einem Tafelbild.
- K7 Die Lernenden präsentieren die Experimentiererergebnisse sach-, adressaten- und situationsgerecht unter Einsatz von Cosmic@Web und dessen Diagrammerstellungsfunktion.

Das Erreichen des Lernziels S2 kann über das Beantworten der letzten Aufgabe des Protokolls zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer eingeschätzt werden. Das Erreichen der beiden Lernziele im Bereich der Förderung von kommunikativen Kompetenzen wird in dem folgenden Abschnitt beschrieben.

#### **Design der dritten Doppelstunde**

Die dritte und abschließende Doppelstunde besteht im Wesentlichen aus zwei Phasen. In den ersten 60 Minuten erhalten die Lernenden die Gelegenheit an den Protokollen weiterzuarbeiten. Dies erfolgt in der gleichen Art und Weise wie schon in der zweiten Doppelstunde. Auch das Erstellen der Präsentation / eines Tafelbilds muss in diesem Zeitraum geschehen. Die in der zweiten Doppelstunde vorgenommene Gruppeneinteilung bleibt bestehen, die Schüler\*innen einer Gruppe können jederzeit miteinander kommunizieren. Die

Lehrperson nimmt in dieser Phase eine Beobachterrolle ein (wie auch schon in den Teaching Experiments). Sie schreitet nur ein, falls sie in einer Gruppe grobe fachliche Fehler oder Probleme, welche einen großen Zeitverlust zur Folge hätten, bemerkt. Ansonsten steht die Lehrkraft für Fragen der Lernenden zur Verfügung. Dem demokratischen Unterrichtsstil entsprechend soll die Lehrperson die Fragen jedoch nicht gleich beantworten, sondern lediglich Hinweise geben, um die Möglichkeit des selbstständigen Problemlösens durch die Schüler\*innen zu schaffen.

Nach Ende der Arbeitsphase erklärt die Lehrperson die genaue Struktur des fünfzehnminütigen Vortrags. Dieser besteht im Wesentlichen aus drei fünfminütigen Parts: dem Erläutern der theoretischen Vorüberlegungen bzw. fachlichen und experimentellen Grundlagen, dem Interpretieren der Diagramme samt Auswertung der Protokollaufgabenstellungen und einer fünfminütigen Diskussion am Ende des Vortrags. Am Schluss erfolgt das Geben von Feedback durch die Lehrperson. Diese Präsentation ist nach dem wissenschaftlichen Standard strukturiert und soll den Abschluss eines authentischen wissenschaftlichen Forschungsprozesses darstellen. In die ersten beiden Teile der Präsentation fließen dabei die Protokollinhalte ein. Die Diskussion dient einerseits zum Klären von Fragen der anderen Lernenden, aber auch zum Identifizieren und Beseitigen von Fehlvorstellungen. Die Funktion des Feedbacks zur Evaluation der Gruppenarbeit besteht dabei hauptsächlich in dem Betonen der in der Arbeitsphase gezeigten Stärken, aber auch in dem Erläutern von Ansatzpunkten, welche verbessert werden können.

Das Erreichen der Lernziele der Unterrichtseinheit kann folglich an dem von den Schüler\*innen erstellten Lernprodukt, also anhand der Präsentation, des Tafelbilds oder der mit Cosmic@Web erstellten Diagramme und zugehörigen Erklärungen eingeschätzt werden.

Analog zur zweiten Stunde ist ein bestimmender Grundsatz für das Stundendesign die inhaltliche Klarheit (vgl. Meyer (2006), S. 78), was insbesondere die Methode der Ergebnissicherung inkludiert. Das Halten der Präsentationen wird klar an die Lernenden kommuniziert und auch verbindlich durchgeführt. Da die Gruppenarbeitsphase einen Großteil der Unterrichtsstunde einnimmt, wird ebenfalls auf das Schaffen eines lernförderlichen Klimas (vgl. Meyer (2006), S. 78) geachtet. Dieses äußert sich durch den Respekt, welchen sich die

einzelnen Gruppenmitglieder einander entgegenbringen und das Einhalten der vorher festgelegten Arbeitsregeln (vgl. Meyer (2006), S. 78).

Lernschwierigkeiten, die durch diese Unterrichtsstunde behoben werden können, sind die fehlerhaften Vorstellungen über den statistischen Charakter der Physik. Die in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Fehlvorstellungen werden einerseits über das direkte Bearbeiten der Aufgaben zum Protokoll zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer behoben, da sich einerseits über die Definition dieser Größe Fehlvorstellungen beseitigen lassen, andererseits werden diese jedoch ebenfalls durch die Auswertung des Histogramms überwunden. Da nur eine Hälfte der Lernenden dieses Protokoll bearbeitet, dient die Diskussionsphase am Ende des Vortrags dazu, eventuell fehlerhafte Schülervorstellungen, die bis dahin noch nicht beseitigt wurden, zu erkennen. Durch Erklärungen der Mitschüler\*innen und ggf. durch die Lehrperson werden so alle Schülervorstellungen erkannt und behoben.

Durch das Bearbeiten der letzten Aufgabe des Protokolls zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen und der anschließenden Präsentation der Aufgabenlösung kann die fehlerhafte Schülervorstellung über die Grundsätze der Relativitätstheorie überwunden werden. Mit dem Beispiel des Myons hat man einen praktischen Beweis, oder wissenschaftlich korrekt gesprochen ein sehr starkes Indiz für die Gültigkeit der speziellen Relativitätstheorie. Anhand des Satzes „Bewegte Uhren gehen langsamer“ kann die Lehrkraft die von den Schüler\*innen gegebenen Erklärungen im Notfall während der Diskussion ergänzen. Da die Relativitätstheorie einen thematischen Schwerpunkt in der Abiturstufe einnimmt, im Grundkurs über den Wahlbereich 3 in Klasse 11 (vgl. SMK (2022), S. 39) und im Leistungskurs über den Wahlbereich 1 (vgl. SMK (2022), S. 52), bietet sich diese Unterrichtseinheit als gute fachliche Vorbereitung an.

Auch dienen der Auswertungs- und Interpretationsprozess beim Bearbeiten der jeweiligen Protokollaufgaben sowie die am Ende stattfindende Diskussion zum Beseitigen der Lernschwierigkeiten beim Umgang mit Diagrammen. Die Argumentation gleicht dabei der Erörterung in Kapitel 5.2.

## Verlaufsplanung:

### 3. Doppelstunde (90 Minuten) – Thema: Arbeiten mit Cosmic@Web / Untersuchung der kosmischen Strahlung

Zeit	Phase	Unterrichtsschritte	Sozialform/ Handlungsmuster	Materialien	Anmerkungen
	Begrüßung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lehrer*in begrüßt Schüler*innen</li> <li>- Beschreibung des Stundenablaufs, d.h. 60 Minuten Arbeitsphase, danach Halten der Präsentationen</li> <li>- Lehrkraft stellt klar, dass jede Gruppe eines Teils des jeweiligen Vortrags hält</li> <li>- Überleitung in Arbeitsphase durch Verweis auf Aufgabenstellung</li> </ul>	LV	Power Point Präsentation (Folien 41-43)	
60'	Arbeitsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schüler*innen bearbeiten die Aufgabenstellung in ihren jeweiligen Gruppen</li> <li>- Organisation und Zuteilung/Arbeitsstrategien können dabei von der Gruppe frei gewählt werden</li> <li>- Hilfsmittel sind dieselben, wie in der 2. Doppelstunde</li> <li>- Schüler*innen erstellen die Struktur des Vortrags, entwerfen ein Lernprodukt (Power-Point Präsentation oder Tafelbild)</li> <li>- Schüler*innen dürfen sich bei Fragen an die Lehrperson wenden/bekommen Gelegenheit zum Fragen stellen</li> </ul> <p>Rolle der Lehrperson</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- allgemein stiller Beobachter, d.h. Lehrkraft wird nur durch Aufforderung seitens der Lernenden aktiv (z.B. bei Fragen, Unklarheiten, zum Vergleich von Musterlösungen etc.)</li> <li>- Lehrperson weist Schüler*innen ggf. auf Besonderheiten des Protokolls hin</li> <li>- Schaffen eines lernförderlichen Klimas durch Kontrollieren des Einhaltens eines freundlichen und konstruktiven Umgangs der Lernenden untereinander</li> <li>- bei Aktivierung der Lehrperson durch Schüler*innen:</li> <li>- Lehrperson gibt Hilfestellungen, nimmt die Lösung der Aufgabe jedoch nicht vorweg</li> </ul>	GU	Power Point Präsentation (Folien 44-50) als Musterlösung / Hinweis  Protokolle  AB3 als Musterlösung	

		- regelmäßiges Kontrollieren der Fortschritte der einzelnen Gruppen im Hinblick auf die verbleibende Arbeitszeit			
30'	Präsentation / Diskussion	<p>- Lehrkraft teilt die Vortragsgruppen selbst ein, d.h. bestimmt welche Gruppe welchen Teil des Vortrages halten muss</p> <p>- insgesamt werden zwei Vorträge gehalten</p> <p>Struktur des Vortrags:</p> <p>Einführung (5 Minuten) wird von Gruppe A1, B1 gehalten</p> <p>- Nennen des Namens des Experiments, ggf. Nennen von Hintergrundinformationen</p> <p>- Nennen der theoretischen Vorüberlegungen (Vorkenntnisse, Versuchsaufbau, Materialliste, Funktion der einzelnen Versuchsgeräte, Messprinzip)</p> <p>Datenanalyse und Auswertung (5 Minuten) wird von Gruppe A2, B2 gehalten</p> <p>- Zeigen der mit Cosmic@Web erstellten Diagramme</p> <p>- Beschreiben und Interpretieren dieser Diagramme</p> <p>- Erklärung des Diagramminhalts unter Einbezug des physikalischen Hintergrundwissens (dabei Orientierung an den Auswertungsaufgaben)</p> <p>- ggf. Formulieren einer Schlussfolgerung bzw. offen gebliebenen Fragen</p> <p>Diskussion (5 Minuten)</p> <p>- alle Lernende, die das jeweilige Protokoll bearbeiteten (zwei Gruppen) stehen für Fragen zur Verfügung</p> <p>- Zuhörer*innen stellen Fragen bzgl. der Vortragsinhalte, aber auch falls Unklarheiten/Unverständnisse vorhanden sind</p> <p>- Möglichkeit des Eingehens auf eventuelle Messunsicherheiten bei der Datenerhebung</p> <p>Rolle der Lehrperson:</p> <p>- ebenfalls Zuhörer</p> <p>- bei Diskussion kann eingegriffen werden, falls Vortragende eine Frage nicht korrekt bzw. nicht in befriedigendem Ausmaß klären können</p> <p>- ebenfalls Eingehen auf von den Lernenden gezeigte Schülervorstellungen, Klären dieser Vorstellungen durch geeignete Veranschaulichungen</p>	Schülervortrag	von den Schüler*innen entwickelte Lernprodukte (Präsentationsformen)	<p>Während des Vortrags sind die Zuhörer*innen dazu angehalten, aufmerksam zuzuhören / sich Notizen zu machen</p> <p>Grundlage für die spätere Diskussion, bei der möglichst alle Lernenden angeregt teilnehmen</p> <p>Wahrscheinlich ist ein Eingreifen nötig bei Erklärungen bzgl. der spez. Relativitätstheorie</p>

	Zusammenfassung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schüler*innen fassen die Unterrichtsinhalte der Astroteilchenphysik zusammen</li> <li>- Schüler*innen beschreiben ihre Erfahrungen und gesammelten Erkenntnisse beim Arbeiten mit Cosmic@Web</li> <li>- Feedback: Was fanden die Schüler*innen besonders interessant?</li> </ul>	UG		Fokus soll auf Lernende und deren Erfahrungen gelegt werden
--	-----------------	---	----	--	---

## 6 Fazit

Im Rahmen der Teaching Experiments konnten verschiedene Erkenntnisse im Bereich des Arbeitens mit Cosmic@Web und dem damit verbundenen Problemlöseverhalten gesammelt und in der anschließenden Reflexion sowie in der Auswertung evaluiert werden. Als erstes kann festgestellt werden, dass die Lernenden den Einsatz von Cosmic@Web und besonders die Möglichkeiten für das Erstellen vielfältiger Diagramme befürworten. Ein\*e Teilnehmer\*in nannte die Möglichkeit des Darstellens der Abhängigkeiten von verschiedenen physikalischen Größen „beeindruckend“. Trotz des von zwei Schülern\*innen angesprochenen großen Themenumfangs waren alle Jugendlichen der Meinung, dass Cosmic@Web einen ihrer Meinung nach interessanten Beitrag für den Physikunterricht darstellen würde. Besonders der Zusammenhang zwischen der Diagrammauswertung und der Erklärung der Diagramme mittels der physikalischen Modelle sei interessant und aufschlussreich gewesen.

Des Weiteren konnten die drei Forschungsfragen beantwortet werden. Zunächst wurde festgestellt, dass beim Umgang mit Cosmic@Web Kompetenzen in den Bereichen der Kommunikation, des Erkenntnisgewinns und des Sachwissens gefördert werden können. Die Stärke und der Umfang dieser Förderung hängen dabei von der Art der Implementation in den Unterricht und dem zeitlichen Umfang, welcher dem Arbeiten mit Cosmic@Web gewidmet wird, ab. Die Grundlagen dieser Kompetenzen müssen in den vorangegangenen Schuljahren im Physikunterricht gelegt und können anschließend durch das Arbeiten mit Cosmic@Web weiterentwickelt und verbessert werden. In diesem Zusammenhang konnte ebenfalls festgestellt werden, dass Cosmic@Web es den Lernenden ermöglicht, astroteilchenphysikalische Inhalte zu begreifen und in bestehende physikalische Modelle einzuordnen. Beispielhaft kann an dieser Stelle die Abhängigkeit der Myonenrate von der Temperatur genannt werden. Für die Erklärung dieses Phänomens griffen die Lernenden auf die Definition der Temperatur als mittlere kinetische Energie der Teilchen zurück und erklärten dementsprechend diese neue Beobachtung mit Hilfe bereits vorhandenen physikalischen Hintergrundwissens.

Jedoch müssen an dieser Stelle auch die aufgetretenen Probleme beim Umgang mit Cosmic@Web erörtert werden. Das Einarbeiten in die unterschiedlichen Funktionen von



Cosmic@Web, was die Diagrammerstellungsfunktion, aber auch die Darstellung der für das Experiment relevanten Informationen beinhaltet, ist sehr komplex. Selbst unter Zuhilfenahme des Erklärvideos und des Tutorials würde es einige Zeit brauchen, damit die Schüler\*innen selbstständig mit diesem Tool arbeiten könnten. Für die Anpassung an den Schulunterricht wird deshalb zwingend erforderlich, dass die Einführung unter der Notwendigkeit der Betreuung durch eine Lehrkraft vollzogen wird. Auch die Tatsache, dass Cosmic@Web auf dem Apple-Internet-Browser „Safari“ nur bedingt oder im schlimmsten Fall gar nicht läuft, muss beachtet werden. Für die Nutzung von Cosmic@Web im Schulunterricht ist die vertiefte Einarbeitung der Lehrperson in das Tool und in die zugrundeliegenden astroteilchenphysikalischen Fachinhalte quasi verpflichtend. Da dies mit erhöhtem Zeitaufwand verbunden ist, kann man an dieser Stelle ebenfalls von einem Hindernis sprechen.

Da es zum Einsatz von Cosmic@Web bisher sehr wenig Literatur gibt, welche über den Forschungsstand zu Implementation dieses didaktischen Werkzeugs in den Schulunterricht Aufschluss gibt, müssten die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sicherlich noch durch andere Forschungen weiter untersucht und dann gegebenenfalls bestätigt werden.

Das auf den Teaching Experiments aufbauende Unterrichtskonzept zur Astroteilchenphysik knüpft an den Lerninhalten der Astronomie aus der zehnten Klassenstufe an. Dabei wird zunächst der grundlegende Kerngedanke der Astroteilchenphysik durch das Verbinden der drei grundlegenden Disziplinen (Astronomie, Kosmologie und Teilchenphysik) beschrieben. Anschließend wird zur kosmischen Strahlung, zu Myonen, Experimenten und Nachweismethoden dieser Teilchen übergeleitet. In den folgenden beiden Doppelstunden wird der Blick auf Cosmic@Web und die damit verbundene Möglichkeit zum Erforschen und Beantworten wissenschaftlicher Fragen gerichtet. Besonders stehen dabei die CosMO-Mühle sowie das LiDO-Experiment im Vordergrund mit denen sich die Ankunftsrichtung und die mittlere Lebensdauer der Myonen untersuchen lässt.

Alternativ wäre es sicherlich möglich auch den Einstieg in die Astroteilchenphysik über Cosmic@Web zu gestalten. In Verbindung mit der Betonung der Nature of Science und einem berufsbezogenen Physikunterricht, der den Arbeitsprozess als Wissenschaftler\*in stark

betont, ließen sich die Lernenden ebenfalls motivieren. Für dieses Unterrichtskonzept wären sechs Unterrichtsstunden jedoch nicht ausreichend, da die Lernenden der zehnten Klassenstufe mit Sicherheit zwei oder drei Doppelstunden benötigen würden, um sich selbstständig mit den von Cosmic@Web verfügbaren Ressourcen in die fachlichen Grundlagen einzuarbeiten.

Zusammenfassend stellt sich nun die Frage, ob sich Cosmic@Web für die Vermittlung astroteilchenphysikalischer Themeninhalte im Physikunterricht eignet. Diese Frage kann man durchaus mit ja beantworten, jedoch ist dies nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Der Erfolg des Einsatzes von Cosmic@Web korreliert maßgeblich mit der vorherigen Einarbeitung durch die Lehrkraft. Durch Weiterbildungen oder gute fachlich und didaktisch konzipierte Materialien zum selbstständigen Einarbeiten in die Funktionen von Cosmic@Web könnte man Lehrkräften den Einstieg zur Arbeit mit diesem Online-Tool in Zukunft erleichtern. Cosmic@Web bietet auf jeden Fall das Potenzial, ein großes Anliegen vieler Physiklehrer\*innen zu erfüllen, indem der Themenkomplex der Astroteilchenphysik über das Nutzen des Online Tools forschungsnah, spannend, kompetenz- und interessensfördernd unterrichtet werden kann.

## 7 Literaturverzeichnis

Beichner, R. J. (1994): *Testing student interpretation of kinematic graphs*. In: American Association of Physics Teachers, American Institute of Physics (Hrsg.) (1994): *American Journal of Physics*, Vol. 62, No. 8 August 1994, nicht angegeben, S. 750 – 762.

Bradascio, F. et al. (2019): *Cosmic@Web – Astroparticle learning plattform for students*, 36th International Cosmic Ray Conference, Madison, WI, USA,  
[URL: <https://inspirehep.net/files/c726f636a763682d03b7bb4c0b4f9750>, Datum des letzten Zugriffs: 09.04.2024].

Burde, J.-P. (2018): *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells*. In: Niedderer, H., Fischler H., Sumfleth E. (Hrsg.) (2018): *Studien zum Physik- und Chemielernen Band 259*, Logos-Verlag, Berlin.

Gigl, F., Cauet, C., Kauertz, A. (2016): *Problemlösen im Physikunterricht: Lerngelegenheiten und Assessment?* In: Maurer, C. (Hrsg.) (2016): *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Band 37, Jahrestagung in Zürich 2016, Regensburg, S. 708 – 711.

Girwidz, R. (2009): *Neue Medien und Multimedia*. In: Kricher, E., Girwidz, R. Häußler, P. (Hrsg.) (2009): *Physikdidaktik. Theorie und Praxis. 2. Auflage*, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 423 – 450.

Gruppen, C. (2018): *Einstieg in die Astroteilchenphysik. Grundlagen, Messungen und Ergebnisse aktueller Forschung*. 2. Auflage, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.

Holyoak, K. J. (1995): *Problem solving*. In: Smith, E. E., Osherson D. N. (Hrsg.) (1995): *A Bradford book. Thinking: An invitation to cognitive science*, 2. Auflage, Mass.: MIT Press, Cambridge, S. 267–296.

Höttecke, D., Hopf, M. (2018): *Schülervorstellungen zur Natur der Naturwissenschaften*. In: Schecker, H. et al. (Hrsg.) (2018): *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*, Springer Spektrum, Berlin, S. 271 – 288.

Hopf, M., Schecker, H. (2018): *Schülervorstellungen zu fortgeschrittenen Themen der Schulphysik*. In: Schecker, H. et al. (Hrsg.) (2018): *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*, Springer Spektrum, Berlin, S. 225 – 242.

Ivanjek, L. et al., American Physical Society (Hrsg.) (2016): *Student reasoning about graphs in different contexts*, PHYSICAL REVIEW PHYSICS EDUCATION RESEARCH 12, 010106, University of Zagreb, Zagreb, Kroatien, [URL: <https://journals.aps.org/prper/pdf/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.010106> , Datum des letzten Zugriffs: 11.04.2024]

Karg, T. et al., Netzwerk Teilchenwelt (Hrsg.) (2021): *Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10. Erstellt in Kooperation mit der Joachim Hertz Stiftung. Band 3. Kosmische Strahlung*, 3. Auflage, Dresden.

Kobel, M. et al., Netzwerk Teilchenwelt (Hrsg.) (2022): *Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10. Erstellt in Kooperation mit der Joachim Hertz Stiftung. Band 1. Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen*, 4. Auflage, Dresden.

Kück, A., Carmesin, O.-H. (2017): *Lösungsstrategien im Physikunterricht*. Didaktik der Physik Frühjahrstagung–Dresden 2017, [URL: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/793>, Datum des letzten Zugriffs: 08.04.2024].

Kultusministerkonferenz (kurz: KMK) (Hrsg.) (2004): *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Physik für den mittleren Schulabschluss. Beschluss vom 16.12.2004*, [URL: [https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf), Datum des letzten Zugriffs: 05.04.2024].

Kultusministerkonferenz (kurz: KMK) (Hrsg.) (2020): *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020*, [URL: [https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2020/2020\\_06\\_18-BildungsstandardsAHR\\_Physik.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf), Datum des letzten Zugriffs: 05.04.2024].

Lachmayer, S., Nerdel, C., Prechtel, H. (2007): *Modellierung kognitiver Fähigkeiten beim Umgang mit Diagrammen im naturwissenschaftlichen Unterricht*. In: Leibniz-Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (Hrsg.) (2007): *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, Jg. 13, Kiel (Kontakt), S. 145 – 160.

Lindenau, P. (2015): *Entwicklung von Unterrichtsmaterialien zur Auswertung von Daten aus Experimenten an modernen Teilchenbeschleunigern*. Masterarbeit im Fach Physik Master-Studiengang Höheres Lehramt an Gymnasien. Technische Universität Dresden, Dresden.

Lindenau, P., Schwerdt, C., Walter, M. (2021): *Students work like astroparticle physicists with Cosmic@Web*, 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2021), 12.07.21-23.07.21, Online – Berlin, Germany, [URL: <https://inspirehep.net/files/486e1ed85118bde4c03e9ba5a8869270>, Datum des letzten Zugriffs: 12.04.2024].

Louis, J. (2021): *Mit der Stringtheorie zum Urknall. Eine Reise an den Ursprung des Universums*. Springer Spektrum, Wiesbaden.

McKenney, S.; Reeves, T. C. (2019): *Conducting educational design research*. Routledge, Abingdon, New York.

Merrill, M. D. (2002): *First Principles of Instruction*. In: Merrill, M. D.: (2002): *Educational Technology, Research and Development*, ProQuest Education Journals, S. 43-59,  
[URL: [https://csapoer.pbworks.com/f/First+Principles+of+Instruction+\(Merrill,+2002\).pdf](https://csapoer.pbworks.com/f/First+Principles+of+Instruction+(Merrill,+2002).pdf), Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].

Meyer; H. (2006): *Guter Unterricht an guten Schulen*. In: Wiley-VCH GmbH (Hrsg.) (2006): *Chemkon*, 13 Nr. 2, 2006, S. 77–83,  
[URL: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ckon.200610041?saml\\_referrer](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ckon.200610041?saml_referrer), Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].

Mietzel, G. (2017): *Pädagogische Psychologie des Lernens und Lehrens. 9. aktualisierte und erweiterte Auflage*, Hogrefe-Verlag, Göttingen.

Schwerdt, C. et al. (2020): *Cosmic@Web. Ein Online-Lernangebot zur Astroteilchenphysik*. In: Barth, M et al. (Hrsg.) (2020): *Unterricht Physik*, Nr. 180, 2020, Friedrich-Verlag, Hannover (Impressum), S. 28- 32.

Sächsisches Staatsministerium für Kultus (kurz: SMK) (Hrsg.) (2021): *Lehrplan Gymnasium. Mathematik*. Dresden.

Sächsisches Staatsministerium für Kultus (kurz: SMK) (Hrsg.) (2022): *Lehrplan Gymnasium. Physik*. Dresden.

Tallman, I: et al. (1993): *A Theory of Problem-Solving Behaviour*. In: American Sociological Association (Hrsg.) (1993): *Social Psychology Quarterly*, Vol. 56, No. 3, Sept. 1993, S. 157-177,  
[URL: [https://www.jstor.org/stable/2786776?casa\\_token=CksGCXSczRsAAAAA%3A6j4NvHY10DK1y-CozsIMlrMafTiPgAAoj9dkGbUAc6g8nXjMLLb9UPHq\\_vPx\\_t\\_RQMXSkBEtr8yAjZyry7J4QQRMiOKpkdbaXm2BGjJwN37kkOv8bGf0&seq=1](https://www.jstor.org/stable/2786776?casa_token=CksGCXSczRsAAAAA%3A6j4NvHY10DK1y-CozsIMlrMafTiPgAAoj9dkGbUAc6g8nXjMLLb9UPHq_vPx_t_RQMXSkBEtr8yAjZyry7J4QQRMiOKpkdbaXm2BGjJwN37kkOv8bGf0&seq=1), Datum des letzten Zugriffs: 09.04.2024].

Uhden, O. (2016): *Verständnisprobleme von Schülerinnen und Schülern beim Verbinden von Physik und Mathematik*. In: Fachsektion Didaktik der Biologie im VBIO, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (Hrsg.) (2016): *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 22(1), 2016, Springer-Verlag, Wiesbaden, S. 13–24, [URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40573-015-0038-4>, Datum des letzten Zugriffs: 03.04.2023].

Willsch, N. (2020): *Der Einfluss von Signaturstärken auf das Problemlöseverhalten am Arbeitsplatz*, Masterarbeit, Zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science, Alpen-Adria-Universität Klagenfurt, Klagenfurt, [URL: <https://netlibrary.aau.at/obvuklhs/content/titleinfo/7028733/full.pdf>, Datum des letzten Zugriffs: 09.04.2024].

Wodzinski, R. (1996): *Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht*, Lit Verlag, Münster.

### Weitere Internetquellen:

DESY-Cosmic@Web, [URL: [https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/cosmicweb/index\\_ger.htm](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/cosmicweb/index_ger.htm), Datum des letzten Zugriffs: 16.03.2024].

DESY-Cosmic@Web-Dokumentation, [URL: [https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/cosmicweb/dokumentation/index\\_ger.html](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/cosmicweb/dokumentation/index_ger.html), Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].

DESY-CosMO-Mühle, [URL: [https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/experimente/cosmo\\_muehle/index\\_ger.html](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/experimente/cosmo_muehle/index_ger.html), Datum des letzten Zugriffs: 09.04.2024].

DESY-Erklärvideo, [URL: <https://www.youtube.com/watch?v=CCfWJlQ57Kw&list=PLNdMuBk8Zn20BIAbMmAKxZOLOUnxBCs0z&index=3>, Datum des letzten Zugriffs: 09.04.2024].

DESY-Experimente [URL: [https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/experimente/index\\_ger.html](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/experimente/index_ger.html), Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].

DESY-Grundlagenwissen zu kosmischen Teilchen, [URL: [https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/grundlagen/index\\_ger.html](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/grundlagen/index_ger.html), Datum des letzten Zugriffs: 09.04.2024].

DESY-LiDO-Experiment, [URL: [https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/experimente/lido/index\\_ger.html](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/experimente/lido/index_ger.html), Datum des letzten Zugriffs: 09.04.2024].

Diagrammerstellungsmodus, [URL: <https://cosmicatweb.desy.de>, Datum des letzten Zugriffs: 09.04.2024].

Planetarium Wolfsburg, [URL: <https://planetarium-wolfsburg.de/de/schule-kita/wanderausstellung/planeten-goetter-wanderer-wochentage/#:~:text=Der%20Planet%20Mars%20erhielt%20seinen,und%20Krieg%20in%20Verbindung%20bra chten.&text=Das%20Wort%20%E2%80%9EPlanet%E2%80%9C%20selber%20stammt,Wanderer%E2%80%9C%20oder%20%E2%80%9Eumherschweifen%E2%80%9C>, Datum des letzten Zugriffs: 08.04.2024].

Süddeutsche Zeitung (Hrsg.): Welche Folgen die Corona-Krise für Schüler hat, [URL: <https://www.sueddeutsche.de/leben/familie-welche-folgen-die-corona-krise-fuer-schueler-hat-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-210119-99-82215>, Datum des letzten Zugriffs: 17.03.2024].

Universität Hamburg (Hrsg.): Design Based Research, [URL: <https://www.hul.uni-hamburg.de/forschung/wissenstransfer/design-based-research.html>, Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].

## 8 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Standardmodell der Elementarteilchen S. 12  
[URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell>  
Datum des letzten Zugriffs: 08.04.2024].
- Abb. 2: Myon-Umwandlung S. 14  
[URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Myon#/media/Datei:Muon\\_Decay.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Myon#/media/Datei:Muon_Decay.svg)  
Datum des letzten Zugriffs: 08.04.2024].
- Abb. 3: Schematische Darstellung eines Teilchenschauers S. 21  
[URL: [https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/grundlagen/einfuehrung/index\\_ger.html](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/grundlagen/einfuehrung/index_ger.html)  
Datum des letzten Zugriffs: 08.04.2024].
- Abb. 4: CosMO-Mühle – Myonenrate(Einfallswinkel)-Diagramm S. 31  
vom Autor erstellt mit [URL: <https://cosmicatweb.desy.de/ctplot/>, Datum des letzten Zugriffs: 12.04.2024].
- Abb. 5: CosMO-Mühle – Myonenrate(Einfallswinkel, Temperatur)-Diagramm S. 32  
vom Autor erstellt mit [URL: <https://cosmicatweb.desy.de/ctplot/>, Datum des letzten Zugriffs: 12.04.2024].
- Abb. 6: Länge der Flugstrecken von Myonen in Abhängigkeit des Einfallswinkels S. 32  
Karg, T. et al., Netzwerk Teilchenwelt (Hrsg.) (2021): *Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10. Erstellt in Kooperation mit der Joachim Hertz Stiftung. Band 3. Kosmische Strahlung*, 3. Auflage, Dresden, S. 17
- Abb. 7: LiDO-Experiment – Zeitdifferenz-Histogramm S. 33  
vom Autor erstellt mit [URL: <https://cosmicatweb.desy.de/ctplot/>, Datum des letzten Zugriffs: 12.04.2024].
- Abb. 8: Schematische Darstellung des Problemlöseverhaltens S. 49  
Tallman, I. et al. (1993): *A Theory of Problem-Solving Behaviour*. In: American Sociological Association (Hrsg.) (1993): *Social Psychology Quarterly*, Vol. 56, No. 3, Sept. 1993, S. 173,  
[URL: [https://www.jstor.org/stable/2786776?casa\\_token=CksGCXSczRsAAAAA%3A6j4NvHY10DK1y-CozsIMlrMafTiPgAAoj9dkGbUAc6g8nXjMLLb9UPHq\\_vPx\\_t\\_RQMXSkBEtr8yAjZyry7J4QQRMiOKpkdbaXm2BGjJwN37kkOv8bGf0&seq=1](https://www.jstor.org/stable/2786776?casa_token=CksGCXSczRsAAAAA%3A6j4NvHY10DK1y-CozsIMlrMafTiPgAAoj9dkGbUAc6g8nXjMLLb9UPHq_vPx_t_RQMXSkBEtr8yAjZyry7J4QQRMiOKpkdbaXm2BGjJwN37kkOv8bGf0&seq=1), Datum des letzten Zugriffs: 09.04.2024].



## Teaching Experiments – Bildquellen:

### Arbeitsblatt 3: Arbeiten mit Diagrammen

Aufgabe 2: Kreisdiagramm

[URL: [https://assets.serlo.org/5f6ca300b2ebf\\_3a0c86f3a405a5ae0fe3c615c5f4acd27a874727.png](https://assets.serlo.org/5f6ca300b2ebf_3a0c86f3a405a5ae0fe3c615c5f4acd27a874727.png)

Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].

### Protokoll: Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen

Aufgabe 3: Wassertank

[URL: <https://www.ung.si/media/images/Malargue-202006-1.width-800.jpg>

Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].

Versuchsaufbau: Abbildung

[URL:

[https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/experimente/cosmo\\_muehle/index\\_ger.html](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/experimente/cosmo_muehle/index_ger.html)

Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].

### Protokoll: Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen

Abbildung 1: Feynman-Diagramm

[URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Myon#/media/Datei:Muon\\_Decay.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Myon#/media/Datei:Muon_Decay.svg)

Datum des letzten Zugriffs: 08.04.2024].

Versuchsaufbau: Abbildung

[URL:

[https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/experimente/lido/index\\_ger.html](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/experimente/lido/index_ger.html)

Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].

### Power-Point-Präsentation

#### Folie 1:

Abb.P1: Strahlungsverteilung

[URL: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQU31phkV0EDM8\\_EUsl-C41uM2KyXNq6NuYL-z5zY5fnNkz04QYKzD1J8BjHRZla1JwIY&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQU31phkV0EDM8_EUsl-C41uM2KyXNq6NuYL-z5zY5fnNkz04QYKzD1J8BjHRZla1JwIY&usqp=CAU) ,

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

Abb. P2: Polarlichter

[URL: <https://www.fr.de/assets/images/28/496/28496734-spektakulaere-polarlichter-sind-ein-einzigartiger-anblick-rund-um-die-tag-und-nacht-gleiche-ist-die-chance-auf-polarlichter-am-groessten-archivbild-2pGxa89yFwea.jpg>]

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

**Folie 6:**

Abb. P3: Stephen Hawking

[URL:

[https://i.guim.co.uk/img/media/b36ce1d3e4122c3d9ea61aae97435427a2be6db7/0\\_314\\_3356\\_2014/master/3356.jpg?width=1200&height=1200&quality=85&auto=format&fit=crop&s=60ab4090e8670420d755b58c39ab63b4](https://i.guim.co.uk/img/media/b36ce1d3e4122c3d9ea61aae97435427a2be6db7/0_314_3356_2014/master/3356.jpg?width=1200&height=1200&quality=85&auto=format&fit=crop&s=60ab4090e8670420d755b58c39ab63b4)

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

Abb. P4: Urknalltheorie

[URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante>

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

**Folie 7:**

Abb. P5: Galaxie

[URL: <https://www.faz.net/aktuell/wissen/weltraum/ueberall-im-all-viele-quasare-1489459.html>

Datum des letzten Zugriffs: 10.11.2023].

Abb. P6:  $v(r)$ -Diagramm

[URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle\\_Materie](https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Materie)

Datum des letzten Zugriffs: 09.11.2023].

Abb. P7: Zusammensetzung des Universums

[URL: [https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:WMAP\\_2008\\_universe\\_content\\_de.png](https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:WMAP_2008_universe_content_de.png)

Datum des letzten Zugriffs: 09.11.2023].

**Folie 8:**

Abb. P8: Bausteine der Materie

[URL:

[https://indico.cern.ch/event/677982/contributions/2776534/attachments/1618732/2574040/Teilchenphysik-\\_Was\\_wir\\_heute\\_wissen\\_Philipp\\_Lindenau\\_IMC\\_Dresden\\_2018.pdf](https://indico.cern.ch/event/677982/contributions/2776534/attachments/1618732/2574040/Teilchenphysik-_Was_wir_heute_wissen_Philipp_Lindenau_IMC_Dresden_2018.pdf)

Datum des letzten Zugriffs: 10.11.2023].

**Folie 9:**

Abb. P9: Bausteine des Atoms

[URL: [https://www.physik.uzh.ch/~strauman/Koll.talk\\_7Apr09.pdf](https://www.physik.uzh.ch/~strauman/Koll.talk_7Apr09.pdf)

Datum des letzten Zugriffs: 09.11.2023].

Abb. P10: Standardmodell der Elementarteilchen

[URL: [https://st.depositphotos.com/1232814/3851/v/950/depositphotos\\_38511129-stock-illustration-standard-model-of-elementary-particles.jpg](https://st.depositphotos.com/1232814/3851/v/950/depositphotos_38511129-stock-illustration-standard-model-of-elementary-particles.jpg)

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

**Folie 10:**

Abb. P11: Gravitation – Karikatur

[URL: <https://www.amazon.de/Hinweisschild-Warnung-pl%C3%B6tzlichen-Sticker-Selbstklebend/dp/B01CPJXF28>

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

Abb. P12: Elektromagnetismus – Karikatur

[URL: <https://stempel-lobenhofer.at/produkt-schlagwort/warnung-vor-gefaehrlicher-elektrischer-spannung/>

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

Abb. P13: Starke Wechselwirkung – Karikatur (bearb.)

[URL: [https://media.istockphoto.com/id/1436279353/de/vektor/warnschild-gesetzt-gelbes-schild-in-form-eines-dreiecks-zur-warnung-vor-vorsicht-alarmgefahr.jpg?s=612x612&w=is&k=20&c=tSHOD9IFKV352uXTmVw55DTR\\_bpUAwtjo3K3lLc0dik=](https://media.istockphoto.com/id/1436279353/de/vektor/warnschild-gesetzt-gelbes-schild-in-form-eines-dreiecks-zur-warnung-vor-vorsicht-alarmgefahr.jpg?s=612x612&w=is&k=20&c=tSHOD9IFKV352uXTmVw55DTR_bpUAwtjo3K3lLc0dik=)

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

Abb. P14: Schwache Wechselwirkung – Karikatur

[URL: <https://www.tierschutzpartei.de/11-03-2014-dritter-jahrestag-der-atom-katastrophe-von-fukushima/>

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

**Folie 12:**

Abb. P15: Wechselwirkung – Analogie

[URL: [https://indico.cern.ch/event/677982/contributions/2776534/attachments/1618732/2574040/Teilchenphysik\\_Was\\_wir\\_heute\\_wissen\\_Philipp\\_Lindenau\\_IMC\\_Dresden\\_2018.pdf](https://indico.cern.ch/event/677982/contributions/2776534/attachments/1618732/2574040/Teilchenphysik_Was_wir_heute_wissen_Philipp_Lindenau_IMC_Dresden_2018.pdf)

Datum des letzten Zugriffs: 10.11.2023].

**Folie 13:**

Abb. P16: Standardmodell der Elementarteilchen

[URL: [https://www.mpg.de/7881858/mpq\\_jb\\_20132](https://www.mpg.de/7881858/mpq_jb_20132)

Datum des letzten Zugriffs: 10.11.2023].

Abb. P17: Kaffeetasse

[URL: <https://www.theguardian.com/science/life-and-physics/2013/jan/09/physics-particlephysics>

Datum des letzten Zugriffs: 10.11.2023].

**Folie 14:**

Abb. P18: „Weltformel“

[URL: <https://www.jigidi.com/jigsaw-puzzle/0cqwtjaq/standard-model-lagrangian/>

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

**Folie 15:**

Abb. P19: Blick ins Universum

[URL: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/weltall-im-computer-das-universum-steht-in-garching-a-358601.html>

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

Abb. P20: Himmelskörper

[URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A4re\\_\(Astronomie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A4re_(Astronomie))

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

Abb. P21: Teilchen

[URL: <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/grundwissen/kurzer-ueberblick-was-ist-teilchenphysik>

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

**Folie 18:**

Abb. P22: Galaxie

[URL: <https://d1g9li960vapg7.cloudfront.net/wp-content/uploads/2022/12/Milchstra%C3%9Fe-1024x580.jpg>

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

**Folie 19:**

Abb. P23: Universum in verschiedenen Spektralbereichen

[URL: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Milky\\_Way\\_multispectral\\_SMIL.svg](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Milky_Way_multispectral_SMIL.svg)

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

**Folie 20:**

Abb. P24: Victor Hess

[URL:

[https://www.weltderphysik.de/fileadmin/\\_processed\\_/f/b/csm\\_20120730\\_HessballonAugust7\\_APSgemeinfrei\\_316b74fd29.jpg](https://www.weltderphysik.de/fileadmin/_processed_/f/b/csm_20120730_HessballonAugust7_APSgemeinfrei_316b74fd29.jpg)

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

Abb. P25: Kosmische Strahlung – Diagramm

[URL: [https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Cosmic\\_ray\\_flux\\_versus\\_particle\\_energy.svg](https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Cosmic_ray_flux_versus_particle_energy.svg)

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

Abb. P26: Kosmische Gamma-Strahlung

[URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Kosmische\\_Gammastrahlung](https://de.wikipedia.org/wiki/Kosmische_Gammastrahlung)

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

**Folie 21:**

Abb. P27: Kosmische Teilchen

[URL: <https://www.triangel.space/event/code-des-universums-kosmischen-superbeschleunigern-auf-der-spur/>

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

**Folie 22:**

Abb. P2: Polarlichter

[URL: <https://www.fr.de/assets/images/28/496/28496734-spektakulaere-polarlichter-sind-ein-einzigartiger-anblick-rund-um-die-tag-und-nacht-gleiche-ist-die-chance-auf-polarlichter-am-groessten-archivbild-2pGxa89yFwea.jpg>

Datum des letzten Zugriffs: 08.11.2023].

**Folie 23:**

Abb. P28: Teilchenschauer

[URL: <https://www.scinexx.de/news/geowissen/raetselhafte-kosmische-strahlen-treffen-die-erde/>

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

Abb. P29: Entstehung sekundärer Teilchen

[URL:

[https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/grundlagen/einfuehrung/index\\_ger.html](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/grundlagen/einfuehrung/index_ger.html)

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

**Folie 24:**

Abb. P30: Weltkarte

[URL:

[https://www.weltderphysik.de/fileadmin/\\_processed\\_/b/e/csm\\_20230302\\_Erde\\_titoOnz\\_iStock\\_69e5353fef.jpg](https://www.weltderphysik.de/fileadmin/_processed_/b/e/csm_20230302_Erde_titoOnz_iStock_69e5353fef.jpg)

Datum des letzten Zugriffs: 11.11.2023].

Abb. P31: Auger-Observatorium

[URL: <https://www.ung.si/media/images/Malargue-202006-1.width-800.jpg>

Datum des letzten Zugriffs: 09.11.2023].

Abb. P32: ICE-Cube Experiment

[URL: [https://news.yale.edu/sites/default/files/styles/horizontal\\_image/public/d6\\_files/trackUnderlcl-v04-CC.jpg?itok=LT24Lfji](https://news.yale.edu/sites/default/files/styles/horizontal_image/public/d6_files/trackUnderlcl-v04-CC.jpg?itok=LT24Lfji)

Datum des letzten Zugriffs: 09.11.2023].

Abb. P33: VERITAS

[URL: [https://www.cfa.harvard.edu/sites/default/files/styles/max\\_650x650/public/2019-05/VERITAS\\_2.jpg?itok=ENV2Lruf](https://www.cfa.harvard.edu/sites/default/files/styles/max_650x650/public/2019-05/VERITAS_2.jpg?itok=ENV2Lruf)

Datum des letzten Zugriffs: 09.11.2023].

Abb. P34: H.E.S.S.

[URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/H.E.S.S.\\_II\\_Telescope\\_Array.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/H.E.S.S._II_Telescope_Array.jpg)

Datum des letzten Zugriffs: 09.11.2023].

Abb. P35: KASCADE-Grande

[URL: <https://astro.uni-wuppertal.de/de/forschungsprojekte/kascade-grande-kosmische-strahlung-im-bereich-1015-18-ev/>

Datum des letzten Zugriffs: 09.11.2023].

**Folie 25:**

Abb. P36: Nebelkammeraufbau

[URL: <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-einfuehrung/ausblick/kontinuierliche-nebelkammer>

Datum des letzten Zugriffs: 10.11.2023].

**Folie 26:**

Abb. P37: Elektron – Nebelkammerspur

[URL: [https://portal-cdn.scnat.ch/asset/178c3407-30ef-51d4-91b5-8adc03c9edf8/nebelkammer\\_themenhinweise.pdf?b=2a117cb2-b596-52a7-b462-52a1c082a2bc&v=1c3b2d58-ea3f-5a9b-8473-9792edd80338\\_0&s=PDAu3prkAnnPEQoyHNgnuQwVljwZ-xzsuJG4P1N1gJvmjgg49\\_P7DoZdcSx084WXj7wWqN7wDeL1V-zIG6rSOIGrlrCkFpjW2DiuKoDPkNKqL0JMr9ID8o3BziAy6K9FVBBBxT\\_p4bbVG\\_nXj\\_ojWhdWdKeMruNLwx\\_v3MXjg](https://portal-cdn.scnat.ch/asset/178c3407-30ef-51d4-91b5-8adc03c9edf8/nebelkammer_themenhinweise.pdf?b=2a117cb2-b596-52a7-b462-52a1c082a2bc&v=1c3b2d58-ea3f-5a9b-8473-9792edd80338_0&s=PDAu3prkAnnPEQoyHNgnuQwVljwZ-xzsuJG4P1N1gJvmjgg49_P7DoZdcSx084WXj7wWqN7wDeL1V-zIG6rSOIGrlrCkFpjW2DiuKoDPkNKqL0JMr9ID8o3BziAy6K9FVBBBxT_p4bbVG_nXj_ojWhdWdKeMruNLwx_v3MXjg)]

Datum des letzten Zugriffs: 12.11.2023].

Abb. P38: Alphateilchen – Nebelkammerspur

Karg, T. et al., Netzwerk Teilchenwelt (Hrsg.) (2021): *Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10. Erstellt in Kooperation mit der Joachim Hertz Stiftung. Band 3. Kosmische Strahlung*, 3. Auflage, Dresden, S. 12.

Abb. P39: Myon-Nebelkammerspur

Karg, T. et al., Netzwerk Teilchenwelt (Hrsg.) (2021): *Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10. Erstellt in Kooperation mit der Joachim Hertz Stiftung. Band 3. Kosmische Strahlung*, 3. Auflage, Dresden, S. 13.

**Folie 27:**

Abb. P40: Langsame Elektronen

Karg, T. et al., Netzwerk Teilchenwelt (Hrsg.) (2021): *Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10. Erstellt in Kooperation mit der Joachim Hertz Stiftung. Band 3. Kosmische Strahlung*, 3. Auflage, Dresden, S. 12.

Abb. P41: Myon

Karg, T. et al., Netzwerk Teilchenwelt (Hrsg.) (2021): *Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10. Erstellt in Kooperation mit der Joachim Hertz Stiftung. Band 3. Kosmische Strahlung*, 3. Auflage, Dresden, S. 13.

Abb. P42: Myonumwandlung

Karg, T. et al., Netzwerk Teilchenwelt (Hrsg.) (2021): *Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10. Erstellt in Kooperation mit der Joachim Hertz Stiftung. Band 3. Kosmische Strahlung*, 3. Auflage, Dresden, S. 13.

**Folie 28:**

Abb. P43: Schematische Darstellung des Tscherenkow-Effekts

[URL: <https://www.slideserve.com/lucita/teilchenidentifikation-mit-cherenkov-detektoren-powerpoint-ppt-presentation>]

Datum des letzten Zugriffs: 12.11.2023].

Abb. P44: Tscherenkow-Strahlung

[URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov\\_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation)

Datum des letzten Zugriffs: 12.11.2023].

**Folie 29:**

Abb. P45: Photomultiplier

[URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>

Datum des letzten Zugriffs: 12.11.2023].

**Folie 30:**

Abb. P46: Schematischer Aufbau des Auger-Observatoriums

[URL: <https://www.weltraum-aktuell.de/index.php/nachrichten2/706-hochenergetische-kosmische-strahlung-ist-extragalaktischen-ursprungs>

Datum des letzten Zugriffs: 12.11.2023].

Abb. P47: Karte des Auger-Observatoriums

[URL: <https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0910/skripte/cosmics02.pdf>

Datum des letzten Zugriffs: 12.11.2023].

**Folie 31:**

Abb. P48: Aufbau Wassertank (bearb.)

[URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmische-strahlung/detektoren/pierre-auger-observatorium/>

Datum des letzten Zugriffs: 12.11.2023].

**Folie 36:**

Abb. P49: Beispiel-Histogramm

[URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Histogramm#/media/Datei:Histogramm.png>

Datum des letzten Zugriffs: 10.11.2024].

**Folie 39:**

Abb. P50: Cosmic@Web – Tools zur Online Analyse

[URL:

[https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort\\_zeuthen/kosmische\\_teilchen/cosmicweb/index\\_ger.html](https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/cosmicweb/index_ger.html)

Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].



**Folie 43:**

Abb. P51: Albert Einstein

[URL: [https://mim.p7s1.io/pis/Id/b44azChLCVyz-c1vEwXZAanB-](https://mim.p7s1.io/pis/Id/b44azChLCVyz-c1vEwXZAanB-DJ78rnq2V2gRWTHzVV6NywNWMSJCEGmZ4YSENP-WRL0b9lo2z78GmGphRwkMiEsEouUs-Vfh7Uo3QA2ZkPcIHwZIJkdTJh45oLTGMBLvYyrkWebZOg/profile:original?w=1070)

[DJ78rnq2V2gRWTHzVV6NywNWMSJCEGmZ4YSENP-WRL0b9lo2z78GmGphRwkMiEsEouUs-](https://mim.p7s1.io/pis/Id/b44azChLCVyz-c1vEwXZAanB-DJ78rnq2V2gRWTHzVV6NywNWMSJCEGmZ4YSENP-WRL0b9lo2z78GmGphRwkMiEsEouUs-Vfh7Uo3QA2ZkPcIHwZIJkdTJh45oLTGMBLvYyrkWebZOg/profile:original?w=1070)

[Vfh7Uo3QA2ZkPcIHwZIJkdTJh45oLTGMBLvYyrkWebZOg/profile:original?w=1070](https://mim.p7s1.io/pis/Id/b44azChLCVyz-c1vEwXZAanB-DJ78rnq2V2gRWTHzVV6NywNWMSJCEGmZ4YSENP-WRL0b9lo2z78GmGphRwkMiEsEouUs-Vfh7Uo3QA2ZkPcIHwZIJkdTJh45oLTGMBLvYyrkWebZOg/profile:original?w=1070)

Datum des letzten Zugriffs: 10.04.2024].

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und dass alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht wurden. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsleistung eingereicht.

Dresden, 18.04.24

Ort, Datum

L. Strobel

Unterschrift

## **A     Anhang**

	Seite
<b>Teaching Experiment-Materialien</b>	<b>160</b>
A.1     Materialien für die Lehrkraft	160
A.2     Notizen des Autors zum gezeigten Problemlöseverhalten	170
A.3     Power Point Präsentation	175
A.4     Arbeitsblätter samt Musterlösungen	186
A.5     Musterdiagramme	209
A.6     Ergänzende Materialien	210
A.7     Concept-Maps	212

### **Anmerkung 1:**

*Die Transkripte, die einzelnen Schüler\*innenlösungen sowie die von den Lernenden erstellten Diagramme sind in dem beiliegenden digitalen Ordner „Teaching Experiments – Anhang“ aufgeführt.*

## **Materialien für das Unterrichtskonzept zur Astroteilchenphysik** 221

A.8     überarbeitete Version der Arbeitsblätter	221
A.9     überarbeitete Version der Power-Point-Präsentation	233
A.10    weitere Arbeitsmaterialien	247

### **Anmerkung 2:**

*Der ausführliche Anhang ist ausschließlich in der digitalen Version dieser Staatsexamensarbeit beigelegt.*

## **Teaching Experiment-Materialien**

### **A.1 Materialien für die Lehrkraft**

#### **Teaching Experiment zum Arbeiten mit Cosmic@Web / Astroteilchenphysik**

##### **1 Einführung**

- Begrüßung: Erfragen des Namens, Vorstellung der eigenen Person / Hintergrund
- Ziel der Forschung an Uni ist die Verbesserung des Physikunterrichts; SuS sollen die Astroteilchenphysik und das Arbeiten mit Diagrammen besser verstehen; Durch deine Teilnahme wird diese Forschung maßgeblich unterstützt und deswegen schon im Vorhinein: Danke.
- Interview findet anonym statt und es werden keine Vorkenntnisse vorausgesetzt, auch wird nicht erwartet, dass die Probanden die Antworten auf mögliche Fragen kennen.
- Damit wir wissen, welche physikalischen Erklärungen noch verbessert werden müssen, ist es wichtig, dass du im folgenden Interview offen sagst, was du denkst, was du unlogisch findest, was du nicht verstehst, usw.
- Interview ist anonym, du bekommst keine Note.
- Hast du noch irgendwelche Fragen, bevor wir anfangen?

##### **2 Erfassung des bisherigen Wissensstandes**

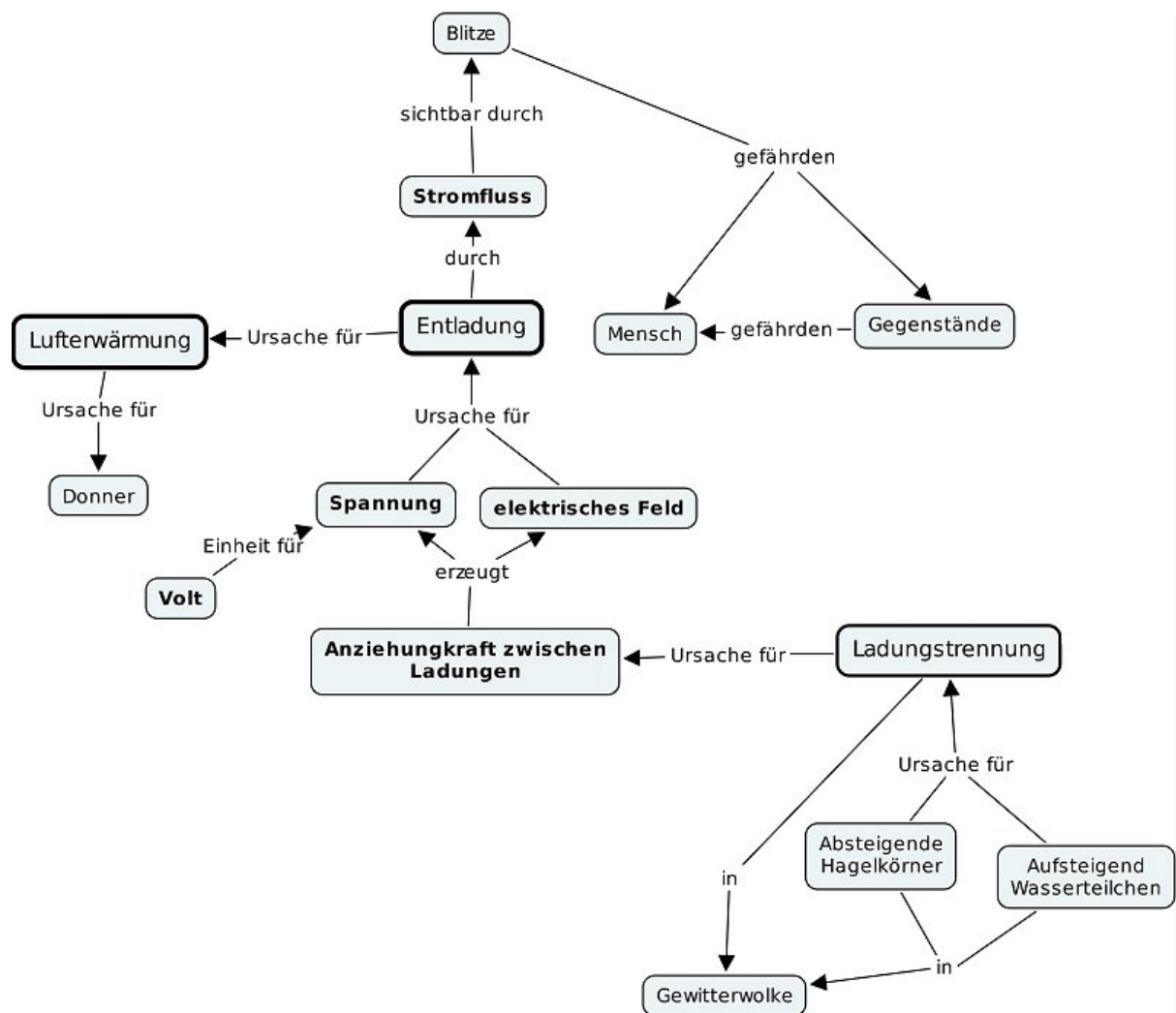
Am Anfang muss euer Vorwissen erfasst werden. Deshalb nehmen wir uns 10 Minuten Zeit, in denen du eine Concept-Map zum Thema Astroteilchenphysik erstellt. Bei einer Concept-Map handelt es sich um ein Netzwerk aus Begriffen, die alle zu einem bestimmten Oberthema gehören, ähnlich wie in einer Mind-Map. Der Unterschied zur Mind-Map besteht jedoch darin, dass diese Begriffe alle miteinander über Pfeile, die entsprechend beschriftet sind, vernetzt werden können.

Ein Beispiel für so eine Concept-Map sehr ihr hier. (siehe nächste Seite)

Gibt es dazu Fragen?

Aufgabe: Erstelle eine Concept-Map zum Thema „Astroteilchenphysik“

Abbildung: Beispiel für eine Concept-Map zum Thema „Anziehungskraft zwischen Ladungen“



URL: [https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp\\_SI/RS/Physik/gewitter02.jpg](https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SI/RS/Physik/gewitter02.jpg)

letzter Zugriff erfolgte am: 31.10.2023

**Aufnahmegerät anschalten!!!**

## Thematische Einheit 1: Astroteilchenphysik

### Erklärphase

Fachlicher Inhalt	Eingesetzte Medien	Anmerkungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Was sind die allgemeinen Ziele der Physik: das Beantworten großer Fragen zum Universum</li> <li>- exemplarisch vier Forschungsfragen erläutern und Interesse der Lernenden wecken</li> </ul>	Power-Point Folien 1,2	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorstellung der Astroteilchenphysik als modernes Teilgebiet der Physik</li> <li>- Schnittstelle zwischen Astronomie, Kosmologie und Teilchenphysik</li> <li>- Wissenschaftler*innen aus der ganzen Welt versuchen mit Hilfe der Astroteilchenphysik Antworten auf Fragen, wie „Wie und warum entstand das Universum?“, „Welche fundamentalen Teilchen gibt es?“ oder „Woher stammen kosmische Teilchen?“ zu finden.</li> </ul>	Power Point Folie 3	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- zuerst die drei grundlegenden Wissenschaften erörtern</li> <li>- Astronomie</li> <li>- Was erforscht die Astronomie?</li> <li>- Was sind große Entdeckungen der Astronomie</li> </ul>	Power Point Folie 4	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Überleitung von der Astronomie zur Kosmologie anhand eines Videos, welches die verschiedenen Größen im Universum beleuchtet</li> </ul>	Power-Point Folie 5 Video: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=MkTflxiinlg">https://www.youtube.com/watch?v=MkTflxiinlg</a> letzter Zugriff am: 28.11.2023	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Während Video Eigenschaften von Himmelskörpern erläutern</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Video endet mit dem Universum als einziges Objekt</li> <li>- Vorstellung der Kosmologie als Wissenschaft, die das Universum als Ganzes erforscht</li> <li>- Verweis auf Urknall-Theorie, die den Beginn des Universums beschreibt</li> <li>- Stephen Hawking als bekannter Kosmologe</li> <li>- Ursprung des Universum hatte, welche Entwicklung es nimmt und welche grundlegenden Strukturen darin vorliegen</li> <li>- ABER: auch unerforschte Themengebiete, wie dunkle Materie</li> </ul>	Power-Point Folie 6, 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dunkle Materie soll das Interesse der Lernenden wecken</li> <li>- Betonung des wissenschaftlichen Forschungsprozesses, bei dem immer wieder neue Fragen aufgeworfen werden</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erläuterung der wissenschaftlichen Grundlage zur Entdeckung der dunklen Materie, anhand des <math>v(r)</math>-Diagramms</li> <li>- Tortendiagramm zum Beschreiben der Zusammensetzung des Universums</li> </ul>	Power-Point Folie 7	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teilchenphysik</li> <li>- arbeitet auf sehr kleinen Längenskalen (im Gegensatz zur Astronomie und Kosmologie)</li> <li>- Übergang von der alltäglichen Erfahrungswelt zur Teilchenphysik</li> <li>- Aus welchen Bausteinen ist dieses Objekt aufgebaut? Kann dieses Objekt weiter zerlegt werden?</li> <li>- Hinführung zu Quarks als elementaren Bausteinen der Materie</li> </ul>	Power-Point Folie 8	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anhand bekannter Begriffe, wie Atom, Atomkern, Proton wird das Vorwissen reaktiviert</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Standardmodell der Elementarteilchen als wichtiges physikalisches Modell zur Beschreibung der fundamentalen Bausteine</li> <li>- Elementarteilchen als Objekt ohne weitere Substruktur vorstellen</li> <li>- Einstieg in das Modell über bekanntes Teilchen: Elektronen</li> <li>- Bausteine der Protonen und Neutronen sind up- und down-Quarks</li> <li>- Proton besteht 2 up- und einem down-Quark, beim Neutron ist es umgekehrt</li> <li>- Einteilung in Materieteilchen und Bosonen</li> <li>- Materieteilchen können in schwere und leichte unterteilt werden</li> <li>- schwere Teilchen zerfallen nach kurzer Zeit</li> <li>- Die gesamte stabile Materie, die wir kennen, ist also grundlegend aus drei Sorten von Legosteinen / Elementarteilchen aufgebaut. Up- und Down-Quarks sowie Elektronen.</li> <li>- Myon ebenfalls wichtiges Teilchen (später mehr dazu)</li> <li>- Myon als „schweres Elektron“ benennen</li> </ul>	Power-Point Folie 9	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Auf Rückfragen und Anzeichen für Unverständnis achten</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Da wir nun geklärt haben wie die Materie grundlegend aufgebaut ist, müssen wir nun noch klären, wie diese kleinsten Teilchen miteinander interagieren, in der Fachsprache Wechselwirkung genannt.</li> <li>- Zusammenfassung aller physikalischen Kräfte zu vier fundamentalen Wechselwirkungen</li> <li>- anhand der Schilder (Folie 10) werden die Wechselwirkungen benannt</li> <li>- Aufzählen mehrerer Beispiele für das Wirken der jeweiligen Wechselwirkung</li> <li>- Teilchen müssen Ladung besitzen, um einer Wechselwirkung teilnehmen zu können</li> <li>- Erläuterung der Bosonen als Botenteilchen</li> <li>- Nutzung der Bootanalogie (siehe Folie 12)</li> </ul>	Power-Point Folie 10, 11, 12	Gluon, engl glue für Leim: es „leimt / klebt“ den Atomkern zusammen
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusammenfassung des Standardmodells der Elementarteilchen</li> <li>- Higgs-Boson erklären (Teilchen, welches den anderen Elementarteilchen deren Masse verleiht)</li> <li>- Erklärung des Ansatzes zur Weltformel</li> </ul>	Power-Point Folie 13, 14	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rückbezug zur Astroteilchenphysik</li> <li>- Erklärung der Phänomene auf großen Längenskalen mit Hilfe der kleinsten Teilchen im Universum</li> <li>- Benennung der kosmischen Strahlung als wichtigen Forschungsgegenstand</li> <li>- Überleitung zu Paraphrasiephase</li> </ul>	Power-Point Folie 15, 16, 17	

### Paraphrasierungen durch die Lernenden:

Inhalte, die angesprochen werden sollen:

1. Kosmologie, Astronomie, Astroteilchenphysik (Längenskala, Forschungsgegenstände)
2. Standardmodell der Elementarteilchen
3. Materieteilchen und Bosonen
4. Vier fundamentale Wechselwirkungen

Gruppe	Stufe der Paraphrase	Verweis (mit rot in der Transkription hervorgehoben)
Gruppe 1	Vollständige Paraphrasierung	Transkription_Gruppe_1 S. 8
Gruppe 2	Vollständige Paraphrasierung	Transkription_Gruppe_2 S. 9
Gruppe 3	Vollständige Paraphrasierung	Transkription_Gruppe_3 S. 9f.
Gruppe 4	Beinahe vollständige Paraphrasierung (4 Wechselwirkungen, Higgs-Boson wurden nicht genannt)	Transkription_Gruppe_4 S. 8f.

### Akzeptanz der Lernenden:

Schüler*in	Akzeptanzstufe	Inhalt / Zitat (mit grün in Transkript gekennzeichnet)
S1	Vollständige Akzeptanz	„Bei mir ist es ähnlich. So von der Kosmologie hat man schonmal irgendwas gehört, zum Beispiel in der Zeitung oder im Fernsehen. Aber auch die Teilchenphysik und diese Wechselwirkungen waren gut erklärt. Ich habe also erstmal keine Fragen.“ (Transkription_Gruppe_1, S. 7)
S2	Vollständige Akzeptanz	„Also ich fand eigentlich alles ganz logisch. Das mit der Astronomie wusste ich schon, aber auch sowas wie Kosmologie und dieses Modell der Elementarteilchen haben auf mich, äh, ganz logisch gewirkt.“ (Transkription_Gruppe_1, S. 7)
S3	Vollständige Akzeptanz	„Ne, war alles supi.“ (Transkription_Gruppe_2, S. 9)
S4	Vollständige Akzeptanz	„Ich konnte soweit alles nachvollziehen. War richtig gut.“ (Transkription_Gruppe_2, S. 9)
S5	Vollständige Akzeptanz	„Ne, eigentlich nicht. Alles war logisch.“ (Transkription_Gruppe_3, S. 9)
S6	Vollständige Akzeptanz Eingeschränkte Akzeptanz	„Also diese Grundlagen waren gut erklärt. Aber ich finde das mit dem Higgs-Boson und der Massenzuteilung, äh, also irgendwie komisch.“ (Transkription_Gruppe_4, S. 8)
S7	Vollständige Akzeptanz	„Ja, auf jeden Fall. Das war interessant mit den drei grundlegenden Wissenschaften und dass die so unterschiedliche Bereiche abdecken. Auch das Standardmodell dieser Elementarteilchen war gut erklärt.“ (Transkription_Gruppe_4, S. 8)

Materialien der Übungsphase: siehe Musterlösung – Arbeitsblatt 1 Grundlagen der Astroteilchenphysik



## Thematische Einheit 2: Kosmische Strahlung

### Erklärphase

Fachlicher Inhalt	Eingesetzte Medien	Anmerkungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einstieg über die Betrachtung des Universums durch verschiedene Wellenlängen</li> <li>- kosmische Strahlung liefert uns ebenfalls solche Informationen über die Struktur und den Aufbau des Universums</li> </ul>	Power-Point Folien 18, 19	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entdeckung der kosmischen Strahlung durch Frank Viktor Hess (1911)</li> <li>- Ballonfahrt in 5000 m Höhe</li> <li>- Betrachtung der Energien der kosmischen Teilchen</li> <li>- Erklärung der Einheit Elektronenvolt</li> <li>- Verweis darauf, dass kosmische Teilchen sehr viel höhere Energien haben als man mit menschlich gebauten Teilchenbeschleunigern erzeugen kann</li> </ul>	Power-Point Folie 20	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufbau der primären kosmischen Strahlung</li> <li>- kleiner Teil an Elektronen</li> <li>- viele Protonen, Alphateilchen oder schwerere Kerne</li> <li>- elektrisch geladene Teilchen werden durch Magnetfelder und elektrische Felder abgelenkt → Suche nach den Quellen der kosmischen Teilchen gestaltet sich schwierig</li> </ul>	Power-Point Folie 21	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Übergang von primärer zu sekundärer Strahlung</li> <li>- Einstieg über Polarlichter</li> <li>- Entstehung der sekundären kosmischen Teilchen erklären</li> <li>- Primärteilchen (energiereich) trifft auf Atmosphäre und stößt mit Luftmolekülen zusammen</li> <li>- Zusammenstöße führen zur Abregung des hochenergetischen Teilchens und es zerfällt in mehrere Sekundärteilchen</li> <li>- Prozess setzt sich über mehrere Stufen fort und es entstehen unglaublich viele (mehrere Millionen) an Sekundärteilchen → Teilchenschauer /-kaskade</li> <li>- erneutes Aufgreifen des Myons als wichtiges sekundäres Teilchen der kosmischen Strahlung, was auf der Erdoberfläche gemessen werden kann und zum Erforschen der kosmischen Strahlung dient</li> </ul>	Power-Point Folien 22, 23	Polarlichter als bekanntes Phänomen dienen ebenfalls zur Verknüpfungen von bereits bekannten Wissensinhalten mit neuen
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nennen mehrerer großer Experimente zum Erforschen der kosmischen Strahlung (z.B. Auger-Observatorium, ICE Cube Experiment)</li> </ul>	Power Point Folie 24	Bedeutung dieser Forschung wird verdeutlicht
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorstellung der Nebelkammer als Nachweisinstrument für elektrisch geladene Teilchen</li> <li>- Erklärung des Aufbaus und der Funktionsweise über die Ionisation der Alkohol-Moleküle</li> <li>- Dicke und Geradheit der Teilchenspuren als Indikatoren für Masse und Geschwindigkeit des nachgewiesenen Teilchens (an Beispielen verdeutlichen)</li> <li>- Teilchenumwandlungen sind ebenfalls beobachtbar (z.B. Myon → Elektron)</li> </ul>	Power-Point Folien 25, 26, 27	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moderne Nachweismethoden</li> <li>- Szintillatoren und Tscherenkow-Effekt</li> <li>- Voraussetzungen und beobachtetes Phänomen des entstehenden Lichts erklären</li> <li>- Geschwindigkeit der Myonen als Eigenschaft für deren Nachweis über den Tscherenkow-Effekt</li> <li>- Beispiel des Auger-Observatorium nutzen, um Nachweisinstrument komplett zu beschreiben</li> <li>- wichtige Elemente: Wasser, welches über den Tscherenkow-Effekt Licht aussendet bei Einfall eines Myons; PMT als Umwandlungsgerät von dem Lichtsignal in ein elektrisches Signal (das vom Computer ausgewertet werden kann)</li> </ul>	Power-Point Folien 28, 29, 30, 31	

## Paraphrasierungen durch die Lernenden:

Inhalte, die angesprochen werden sollen:

1. Entdeckung durch Victor Hess
2. Nachweisinstrumente
3. Zusammensetzung
4. Teilchenschauer (Entstehung der sekundären Strahlung)

Gruppe	Stufe der Paraphrase	Verweis (mit rot in der Transkription hervorgehoben)
Gruppe 1	Vollständige Paraphrasierung	Transkription_Gruppe_1 S. 16f.
Gruppe 2	Vollständige Paraphrasierung	Transkription_Gruppe_2 S. 16f.
Gruppe 3	Vollständige Paraphrasierung	Transkription_Gruppe_3 S. 15
Gruppe 4	Teilweise Paraphrasierung (Teilchenschauer, moderne Nachweisinstrumente fehlen)	Transkription_Gruppe_4 S. 16

## Akzeptanz der Lernenden:

Schüler*in	Akzeptanzstufe	Inhalt / Zitat (mit grün in Transkript gekennzeichnet)
S1	Vollständige Akzeptanz	„Ne sonst, eigentlich nichts. Alles logisch.“ (Transkription_Gruppe_1, S. 16)
S2	Vollständige Akzeptanz	„Bei mir auch. Ich fand das gut erklärt.“ (Transkription_Gruppe_1, S. 16)
S3	Vollständige Akzeptanz	„Ja, also wie bei dem ersten Part. Alles super erklärt. Wirklich.“ (Transkription_Gruppe_2, S. 16)
S4	Vollständige Akzeptanz	„Ich finde es bisher auch spannend. Es wirkt alles schlüssig. Also ich hab nichts auszusetzen.“ (Transkription_Gruppe_2, S. 16)
S5	Vollständige Akzeptanz	„Also, ähm, ich. Das war alles gut erklärt. Mit dem Aufbau der Strahlung und diesen Nachweis über den Effekt. Also habe ich alles verstanden.“ „Ne, war alles logisch. Alles super.“ (Transkription_Gruppe_3, S. 15)
S6	Vollständige Akzeptanz	„Äh, naja, das hat Sinn gemacht. War ein wenig viel auf einmal, aber ich konnte das, äh, da folgen. War schlüssig.“ (Transkription_Gruppe_4, S. 16)
S7	Vollständige Akzeptanz	„Also ich fand das sehr interessant und ja und auch nachvollziehbar.“ (Transkription_Gruppe_4, S. 16)

Materialien der Übungsphase: siehe Musterlösung – Arbeitsblatt 2 Kosmische Strahlung

### **Thematische Einheit 3: Arbeiten mit Diagrammen**

Ablauf:

- Schüler\*innen bearbeiten jede der drei Aufgaben des dritten Arbeitsblattes in Einzelarbeit (siehe Power Point Folie 33)
- Nach jeder Aufgabe: mündlicher Vergleich

Materialien:

- siehe Musterlösung - Arbeitsblatt 3: Arbeiten mit Diagrammen
- für den Vergleich von Aufgabe 2: siehe Power-Point Folien 34, 35, 36
- für den Vergleich von Aufgabe 3: siehe Power-Point-Folie 37

### **Thematische Einheiten 4: Einführung von Cosmic@Web; CosMO-Experiment zur Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen**

Ablauf:

- Scannen des QR-Codes (siehe Power-Point Folie 38)
- Selbstständiges Anschauen des Erklärvideos durch die Teilnehmer\*innen
- Selbstständiges Durchführen des Tutorials durch die Teilnehmer\*innen

Zwischenfrage:

- Gibt es Fragen zur Nutzung von Cosmic@Web?
- Möchtest du etwas anmerken?
- Selbstständiges Bearbeiten der Protokollaufgaben in Einzelarbeit
- Nach jeder Einzelarbeitsphase folgt ein mündlicher Vergleich der entsprechenden Aufgabe

Materialien für den Vergleich der Aufgaben:

- Musterlösung – Protokoll: Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen
- Power-Point Folie 41 zur Veranschaulichung des Musterdiagramms

### Akzeptanz zum Konzept der Ankunftsrichtung von Myonen:

Schüler*in	Akzeptanzstufe	Inhalt / Zitat (mit grün in Transkript gekennzeichnet)
S1	Vollständige Akzeptanz	„Ne, war in Ordnung. Auch, dass wir das selber raussuchen konnten. War in Ordnung.“ (Transkription_Gruppe_1, S. 30)
S2	Vollständige Akzeptanz	„Fand ich auch. Das macht schon Sinn, mit der Temperatur und der Strecke.“ (Transkription_Gruppe_1, S. 30)
S3	Vollständige Akzeptanz	„War gut, war verständlich.“ (Transkription_Gruppe_2, S. 29)
S4	Vollständige Akzeptanz	„Gut, ja macht Sinn.“ (Transkription_Gruppe_2, S. 29)
S5	Vollständige Akzeptanz	„Das ist logisch. Ja, macht Sinn.“ (Transkription_Gruppe_3, S. 25)
S6	Eingeschränkte Akzeptanz	„Äh, es macht schon Sinn. Aber ähm diese Zerfälle. Das kommt mir komisch vor.“ (Transkription_Gruppe_4, S. 31)
S7	Vollständige Akzeptanz	„Also für mich klingt das ganz logisch.“ (Transkription_Gruppe_4, S. 31)

### Thematische Einheit 5: LiDO-Experiment zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen

Ablauf:

- Selbstständiges Bearbeiten der Protokollaufgaben in Einzelarbeit
- Nach jeder Einzelarbeitsphase folgt ein mündlicher Vergleich der entsprechenden Aufgabe

Materialien für den Vergleich der Aufgaben:

- Musterlösung – Protokoll: Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen
- Power-Point Folie 42 zur Veranschaulichung des Musterdiagramms
- Power-Point Folie 43 als Hinweis zum Beantworten der letzten Aufgabe

### Akzeptanz des Konzepts der mittleren Lebensdauer:

Schüler*in	Akzeptanzstufe	Inhalt / Zitat (mit grün in Transkript gekennzeichnet)
S1	Vollständige Akzeptanz	„Also am Anfang eher nicht. Aber mit dem Experiment und so. Das macht schon Sinn, ist halt so ähnlich, wie die Radioaktivität.“ (Transkription_Gruppe_1, S. 36)
S2	Vollständige Akzeptanz	„Ich sehe das auch so. Am Anfang ein bisschen schwer. Aber über die Berechnung ging es dann.“ (Transkription_Gruppe_1, S. 36)
S3	Eingeschränkte Akzeptanz	„Also, naja, irgendwie macht es halt Sinn, dass die Myonen nicht alle genau gleichzeitig sich umwandeln oder, ähm, zerfallen. Aber ja, es ist auch irgendwie komisch. Also naja. (...) Sorry.“ (Transkription_Gruppe_2, S. 39)
S4	Eingeschränkte Akzeptanz	„Also ehrlich gesagt, ähnlich. Also ich verstehe das bis zu einem gewissen Punkt. Aber, so, diese Methode mit der Fitfunktion, die war jetzt nicht so klar, warum man das machen kann. Ja.“ (Transkription_Gruppe_2, S. 39)
S5	Vollständige Akzeptanz	„Ne, also, das wirkt alles ganz logisch. Das macht für mich Sinn. Ja.“ (Transkription_Gruppe_3, S. 31)

S6	Eingeschränkte Akzeptanz	„Hmm, schwierig zu sagen. Irgendwie schon mit dieser Lebenszeit, aber dass wir das so über eine Fit-Funktion, also, heraus, herausgefunden haben, das erscheint mir komisch.“ (Transkription_Gruppe_4, S. 40)
S7	Eingeschränkte Akzeptanz	„Ja, generell kann man sich das irgendwie nicht so ganz gut vorstellen, wie man jetzt darauf kommt. Aber an sich halt. Das macht schon irgendwie Sinn, aber, das ist schwierig zu erklären.“ (Transkription_Gruppe_4, S. 40)

### Akzeptanz des Konzepts der Relativitätstheorie:

Schüler*in	Akzeptanzstufe	Inhalt / Zitat (mit grün in Transkript gekennzeichnet)
S1	Eingeschränkte Akzeptanz	„Ja, also ich verstehe deine Erklärung, aber, ähm, ja (..) Ja. Ich weiß nicht.“ (Transkription_Gruppe_1, S. 37)
S2	Eingeschränkte Akzeptanz	„Naja, ok. Aber so richtig toll vorstellen kann ich mir das nicht..“ (Transkription_Gruppe_1, S. 37)
S3	Keine Akzeptanz	„Also ich muss, ähm, ehrlich sagen, dass das jetzt für mich nicht so viel Sinn macht. Also diese unterschiedliche Zeit, ne, davon höre ich jetzt das erste Mal. Das erschließt sich mir nicht.“ (Transkription_Gruppe_2, S. 40)
S4	Keine Akzeptanz	„Ich sehe das wie *** (Name von S3). Also, das ist ein bisschen schwer zu kapieren. (..)“ (Transkription_Gruppe_2, S. 41)
S5	Vollständige Akzeptanz	„Ja, schon. Also ich habe da auch mal eine Doku drüber geschaut. Also über Einstein und Raumzeit und so.“ (Transkription_Gruppe_3, S. 32)
S6	Keine Akzeptanz	„Ja, also sich das vorzustellen. Ich weiß nicht.“ (Transkription_Gruppe_4, S. 41)
S7	Keine Akzeptanz	„Nein (lacht), also vielleicht liegt das an mir oder so. Aber das war jetzt ganz, also, nicht so logisch.“ (Transkription_Gruppe_4, S. 41)

Während Thematischer Einheit 4 und 5: Dokumentation des Problemlöseverhaltens durch die Lehrkraft

## A.2 Notizen des Autors zum gezeigten Problemlöseverhalten

Schüler\*in 1:

	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV
Erstellen von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)  Keine Rückfragen	Verwendet AB 3: Diagramme als Ressource zur Entscheidungsfindung des passenden Diagrammtyps  Keine zusätzliche Recherche (weder per Google, noch in Cosmic@Web)	Selbstständiges Auswählen aller Parameter (Experiment, Datensatz, Diagrammtyp, Variablen, Titel)  Diagramm wird geplottet  Keine Rückfragen etc.	S1 mit Plot fertig  Diagramm wird Lehrperson gezeigt und die Richtigkeit erfragt
Auswerten von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)	Ressource besteht aus Aufgabe 3 von AB 3 (wichtige Schritte beim Interpretieren von Diagrammen)  Verwenden der Datenbank in Cosmic@Web  Vorgegebener Text für Quellen kosmischer Strahlung	Kein schriftliches Beantworten der Interpretationsaufgabe  Bei mündlichem Vergleich konnte festgestellt werden, dass die Gedankenschritte vorhanden waren (Schüler*in konnte auf Fragen antworten)	Einholen von Feedback bei der Lehrperson
Erstellen von Diagrammen (LiDO)	Problem wurde erkannt (Aufgabenstellung wurde zweimal gelesen)	Analog zu CosMO, hauptsächlich Verwendung des dritten Arbeitsblattes (Aufgabe 2)  Keine anderen Ressourcen zur Recherche genutzt	Selbstständiges Auswählen aller Parameter (Experiment, Datensatz, Diagrammtyp, Variablen, Titel)  Diagramm wird geplottet  Keine Rückfragen etc.	Analog zu CosMO
Auswerten von Diagrammen (LiDO)	Lesen der Aufgabenstellungen, Übergang zur Beantwortung → Problem wurde erkannt	Ressource besteht aus Aufgabe 3 von AB 3 (wichtige Schritte beim Interpretieren von Diagrammen)  Datenbank der Experimente als weitere Ressource  Theoretische Vorüberlegungen im Protokoll als Beispiel für das Erstellen der Fitfunktion  Leifi-Physik als Quelle für Beantwortung der Relativitätstheorie-Aufgabe	Schriftliches Beantworten mit Tablet, allerdings nicht ausführlich  Bei mündlichen Vergleich folgten ausführliche Erklärungen	Erfragen der Richtigkeit bei Lehrperson, ggf. Nachfragen nach mündlichem Vergleich

Schüler\*in 2:

	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV
Erstellen von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)  Keine Rückfragen	Verwendet AB 3: Diagramme als Ressource zur Entscheidungsfindung des passenden Diagrammtyps  Ebenfalls Recherchieren in Cosmic@Web (Experiment-Datenbank) → Lesen des Messprinzips sowie das Aufrufen der Beispieldiagramme  Keine weiteren Ressourcen	Selbstständiges Belegen der Parameter, dabei Abgleich mit dem Protokoll (z.B. bei Experiment-Name)  Plotten des Diagramms  Keine Rückfragen	Geplottetes Diagramm wird Lehrperson gezeigt  Frage nach dessen Korrektheit  KEIN Vergleich mit Datenbank / Beispieldiagramm
Auswerten von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)	Verwendete Ressourcen: Ab3 Aufgabe 3 und Datenbank in Cosmic@Web	Schriftliches Beantworten der Fragen	Evaluation durch Lehrkraft nach mündlichem Vergleich (Nachfrage: War das alles so richtig)

		Vorgegebener Text für Quellen kosmischer Strahlung		
		Keine weiteren Quellen		
Erstellen von Diagrammen (LiDO)	Problem über Aufgabenstellung erkannt  Keine Rückfragen	Analog zu CosMO, d.h. Recherche über AB 3, aber auch Cosmic@Web  Keine weiteren Ressourcen	Analog zu CosMO	Geplottetes Diagramm wird Lehrperson gezeigt  Frage nach dessen Korrektheit  KEIN Vergleich mit Datenbank / Beispiel-diagramm
Auswerten von Diagrammen (LiDO)	Nach Lesen der Aufgabenstellung Bearbeiten dieser → Problem erkannt und als relevant beurteilt	Verwendete Ressourcen: Ab3 Aufgabe 3 und Datenbank in Cosmic@Web  Theoretische Vorüberlegungen im Protokoll als Beispiel für das Erstellen der Fitfunktion  Aufgabenstellung, in der die benötigten Formeln angegeben sind  Keine weiteren Quellen ,außer Leifi-Physik für die letzte Aufgabe	Schriftliches Beantworten der Aufgaben	Evaluation durch Lehrkraft nach mündlichem Vergleich (Nachfrage: War das alles so richtig)

### Schüler\*in 3:

	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV
Erstellen von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)	Verwendet AB 3: Diagramme als Ressource zur Entscheidungsfindung des passenden Diagrammtyps  Aufgabe 2 reicht offenbar als einzige Ressource für S3 aus  Keine weiteren Recherchen	Diagrammtyp, Variablen werden selbstständig ausgewählt  Bei zu verwendendem Datensatz fragt S3 nach  Diagramm wird geplottet	Evaluation durch Lehrperson, Erfragung der Richtigkeit des Diagramms  Keine selbstständige Evaluation der Problemlöseaktion
Auswerten von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)	Nutzung von Ab3 Aufgabe 3  Vorgegebener Text für Quellen kosmischer Strahlung  Lehrperson wird mehrere Male bzgl. einer Aufgabe gefragt	Schriftliches Beantworten	Mündlicher Vergleich  Anschließend zeigen der schriftlichen Antwort und Evaluation durch die Lehrperson wird erbeten
Erstellen von Diagrammen (LiDO)	Problem durch Lesen der Aufgabenstellung erkannt, dabei zusätzliches Lesen der bereits bearbeiteten Aufgaben zu theoretischen Vorüberlegungen	Analog zu CosMO, d.h. Verwendung von Aufgabe 2 auf AB 3, Vergleich der Aufgabenstellung mit Eigenschaften der Diagramme in Tabelle (S3 ruft beide Dokumente abwechseln auf Tablet auf)  Keine weiteren Recherchequellen	Diagrammtyp, Variablen werden selbstständig ausgewählt  Diagramm wird geplottet  Diesmal keine Nachfrage bzgl. des Datensatzes	Evaluation durch Lehrperson, Erfragung der Richtigkeit des Diagramms  Keine selbstständige Evaluation der Problemlöseaktion
Auswerten von Diagrammen (LiDO)	Aufgabenstellungen wird mehrmals gelesen  Beginnen der Aufgabenbearbeitung → Problem wurde erkannt	Analog zu CosMO  Häufige Fragen an Lehrperson, z.B. bei Berechnung der Myonengeschwindigkeit oder bei Eignung der Internetquelle	Schriftliches Beantworten, teilweise erneutes Aufrufen der Recherchequellen  Nachfrage bei Lehrperson während des Beantwortens	Mündlicher Vergleich

		Protokoll (für Erstellen der Fitfunktion und Entnahme der Gleichung für die mittlere Lebensdauer)  Leifi-Physik als Informationsquelle für Relativitätstheorie		
--	--	--	--	--

#### Schüler\*in 4:

	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV
Erstellen von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)	Verwendet AB 3: Diagramme als Ressource zur Entscheidungsfindung des passenden Diagrammtyps  Abgleich der Tabelle (Aufgabe 2) mit Möglichkeiten zur Diagrammerstellung in Diagrammerstellungsmodus (Cosmic@Web)  Keine weiteren Recherchequellen	Eigenständiges Auswählen der Parameter im Diagrammerstellungsmodus  Plotten des Diagramms	Evaluation durch Lehrperson, Erfragung der Richtigkeit des Diagramms  Keine selbstständige Evaluation der Problemlöseaktion
Auswerten von Diagrammen (CosMO)	Problemidentifizierung durch Lesen der Aufgabenstellung	Einzige Informationsquelle ist Aufgabe 3 von AB 3  Vorgegebener Text für Quellen kosmischer Strahlung	Schriftliches Beantworten (starke Orientierung an Aufgabe 3)	Evaluation durch Lehrperson wird erbeten vor mündlichem Vergleich
Erstellen von Diagrammen (LiDO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)  Keine Rückfragen, sofortiges Beginnen mit Phase II	Ressource: AB 3 Aufgabe 2 Entscheidung für einen Diagrammtyp mit anschließendem Vergleich der Parameter im Diagrammerstellungsmodus  Keine weiteren Informationsquellen verwendet	Analog zu CosMO  Während der Auswahl, Abgleich mit Begriffen des Protokolls / der Aufgabenstellung	Evaluation durch Lehrperson, Erfragung der Richtigkeit des Diagramms  Keine selbstständige Evaluation der Problemlöseaktion
Auswerten von Diagrammen (LiDO)	Problem wahrgenommen durch Lesen der Aufgabenstellung	Analog zu CosMO  Protokoll (für Erstellen der Fitfunktion und Entnahme der Gleichung für die mittlere Lebensdauer)  Aber: Leifi-Physik wird als Quelle für letzte Aufgabe genutzt Dabei Ignorieren anderer Internetseiten, explizite Suche nach Leifi-Physik	Schriftliches Beantworten (Orientierung an Aufgabe 3)  Orientierung an vorher erstellter Fitfunktion	Evaluation durch Lehrperson wird erbeten vor mündlichem Vergleich



Schüler\*in 5:

	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV
Erstellen von Diagrammen (CosMO)	Lesen der Aufgabenstellung  Problem wurde erkannt → Übergang zu Recherche ohne Fragen	Verwendet AB 3: Diagramme als Ressource zur Entscheidungsfindung des passenden Diagrammtyps  Auch Recherche in Cosmic@Web	Auswählen der Parameter  Plotten des Diagramms	Evaluation zuerst über Vergleich mit dem Beispieldiagramm in der Experimente-Datenbank  Danach wird die Lösung der Lehrperson gezeigt
Auswerten von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)	Recherchequellen: AB3 Aufgabe 3, Experimente-Datenbank, Vorgegebener Text für Quellen kosmischer Strahlung	schriftliches Beantworten  immer wieder Abgleich mit Aufgabe 3 von AB 3	Selbstevaluation mit gegebenen Text und Beispieldiagramm
Erstellen von Diagrammen (LiDO)	Analog zu CosMO, Lesen der Aufgabenstellung identifiziert Problem und sofortiger Übergang zu Phase II	Analog zu CosMO Gleiche Vorgehensweise	Auswählen der Parameter  Plotten des Diagramms  Bemerkt, dass Titel fehlt Selbstständiges Korrigieren	Evaluation zuerst über Vergleich mit dem Beispieldiagramm in der Experimente-Datenbank  Danach wird die Lösung der Lehrperson gezeigt
Auswerten von Diagrammen (LiDO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung) und anschließender Übergang zur Bearbeitung	Recherchequellen AB 3 Aufgabe 3 Experimente-Datenbank  Protokollaufgabe zur Fitfunktion (theoretische Vorüberlegungen)  Für letzte Aufgabe: Wikipedia: Relativitätstheorie, Leifi-Physik, verschiedene Internetseiten zu Experimenten (z.B. Nachweis der Gravitationswellen)	schriftliches Beantworten  immer wieder Abgleich mit Aufgabe 3 von AB 3 bzw. mit Internetquellen	Nur bei letzter Aufgabe Evaluation durch die Lehrperson erbeten, dabei weitestgehend mündlich die Lösung der Aufgabe erörtert

Schüler\*in 6:

	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV
Erstellen von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)  Stellen einer Frage über die Handhabung von Cosmic@Web	Verwendet AB 3: Diagramme als Ressource zur Entscheidungsfindung des passenden Diagrammtyps	Auswählen der Parameter  Regelmäßiger Abgleich mit dem Arbeitsblatt / der Tabelle  S6 ist bei Zuordnung der Variablen zu den Achsen nicht sicher (mehrmaliges Schließen des Menüfensters)  Plotten des Diagramms  Keine selbstständige Korrektur der falschen Variablenzuordnung → Hinweis der Lehrperson	Evaluation durch Lehrperson, Erfragung der Richtigkeit des Diagramms  Keine selbstständige Evaluation der Problemlöseaktion
Auswerten von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)	Nutzung von Ab 3 Aufgabe 3 zum Abarbeiten der Interpretationsschritte  Frage an die Lehrperson bzgl. der Verteilung der Messpunkte (ist das eine parabelförmige Verteilung?)	Schriftliches Beantworten  Starke Orientierung an den Schritten aus Aufgabe 3	Evaluation durch Lehrperson erbeten (nach Abschluss jeder Aufgabe)

		Vorgegebener Text für Quellen kosmischer Strahlung		
Erstellen von Diagrammen (LiDO)	Problem über Aufgabenstellung erkannt	Informationsquellen ist wieder AB 3 Aufgabe 2, keine weiteren Recherchen	Auswählen der Parameter  Regelmäßiger Abgleich mit dem Arbeitsblatt / der Tabelle  Plotten des Diagramms	Evaluation durch Lehrperson, Erfragung der Richtigkeit des Diagramms  Keine selbstständige Evaluation der Problemlöseaktion
Auswerten von Diagrammen (LiDO)	Problem wurde erkannt, durch Lesen der Aufgabenstellung  Übergehen zu Arbeitsphase	Nutzung von AB 3 Aufgabe 3 zum Abarbeiten der Interpretationsschritte  Fragen an die Lehrperson bzgl. der der Formeln (Wo kann ich die Formel für die mittlere Lebensdauer nachgucken, wie sah die Formel für die Geschwindigkeit nochmal aus)  Theoretische Vorüberlegungen für Fitfunktionsgleichung  Leifi-Physik für relativistisches Verhalten der Myonen	Schriftliches Beantworten  Enge Bindung an Aufgabe 3 (AB 3)  Bei letzter Aufgabe: Leifi-Seite mehrmals gelesen, am Ende jedoch nur Übernahme einer Aussage	Evaluation durch Lehrperson erbeten (nach Abschluss jeder Aufgabe)

#### Schüler\*in 7:

	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV
Erstellen von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)	Verwendet AB 3: Diagramme als Ressource zur Entscheidungsfindung des passenden Diagrammtyps	Auswählen der Parameter im Diagrammerstellungsmodus  Plotten des Diagramms	Evaluation durch Lehrperson, Erfragung der Richtigkeit des Diagramms  Keine selbstständige Evaluation der Problemlöseaktion
Auswerten von Diagrammen (CosMO)	Problem wurde erkannt (Lesen der Aufgabenstellung)	Nutzung von AB3 Aufgabe 3  Vorgegebener Text für Quellen kosmischer Strahlung  Keine weiteren Recherchequellen	Festlegen der Struktur anhand von Aufgabe 3  Entweder schriftliches Beantworten oder mündlich durch Gespräch mit Lehrperson	Evaluation durch Lehrperson, Erfragung der Richtigkeit der Lösungen
Erstellen von Diagrammen (LiDO)	Liest Aufgabenstellung, sofortiges Beginnen der Recherche lässt auf Identifizierung des Problems schließen	Analog zu CosMO, Aufgabe 2 wird verwendet, aber mehrmalige Vergleich mit Begriffen in der Aufgabenstellung	Auswählen der Parameter  S7 verwendet Einheit time  Nach Plotten überprüft S7 das Diagramm durch Abgleich mit der Aufgabenstellung → selbstständige Korrektur der Variable	Evaluation durch Lehrperson, Erfragung der Richtigkeit des Diagramms  Keine selbstständige Evaluation der Problemlöseaktion
Auswerten von Diagrammen (LiDO)	Nach Lesen der Aufgabenstellung folgt Recherche, Problem wurde also erkannt und als relevant beurteilt	Nutzung von AB3 Aufgabe 3  Protokoll (Fitfunktion)  Leifi-Physik für letzte Aufgabe  Keine weiteren Recherchequellen	Bei Interpretation: Orientierung an Aufgabe 3 und vorherigem Protokoll  Bei Fitfunktion Orientierung an theoretischen Vorüberlegungen Aufgabe 2  Leifi-Physik-Seite einmal durchgelesen → Formulieren der Antwort	Evaluation durch Lehrperson, Erfragung der Richtigkeit der Lösungen

### A.3 Power Point Präsentation

Das Universum verstehen  
–  
Astroteilchenphysik

Lukas Schröter  
Technische Universität Dresden  
09.01.2024



Abb. P2

Abb. P1

1

Was ist Astroteilchenphysik?



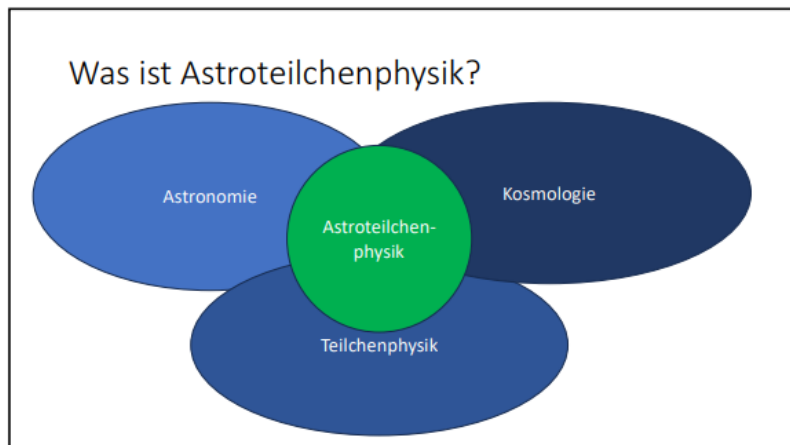
Wie und Wann entstand das Universum?

Welche fundamentalen Kräfte gibt es?

Welche fundamentalen Bausteine gibt es?

Was ist dunkle Materie?

2



3

Astronomie

- Beobachtung und Untersuchung von Himmelskörpern (z.B. Planeten, Sterne oder Galaxien)
- Längenskala: AE( Astronomische Einheit), Parsec, Lichtjahr
- Wichtige Erkenntnisse:
  - heliozentrisches Weltbild
  - Planetenbahnen um die Sonne
  - Lebensstadien eines Sterns
  - Verhalten von Galaxien

4

## Astronomie → Kosmologie

Schau dir das folgende Video an. Achte dabei besonders auf die Längenskala der astronomischen Objekte.

<https://www.youtube.com/watch?v=MkTflxlnlg>

5

## Kosmologie

- Wissenschaft des gesamten Universums
- Beschäftigt sich mit:
  - Ursprung, Entwicklung des Universums
  - grundlegende Strukturen
  - Dunkler Materie

Abb. P4

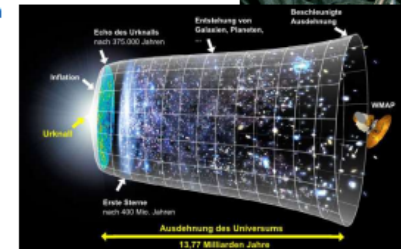


Abb. P3

6

## Dunkle Materie

Abb. P5

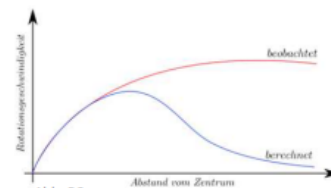


Abb. P6

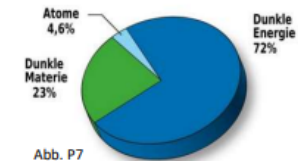


Abb. P7

7

## Teilchenphysik

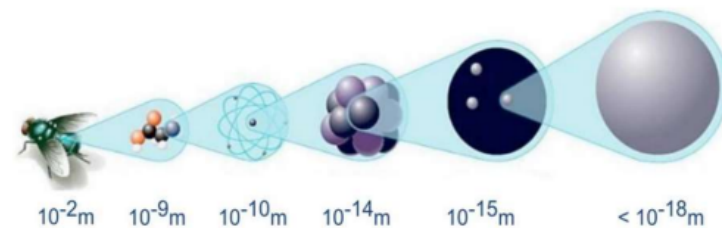
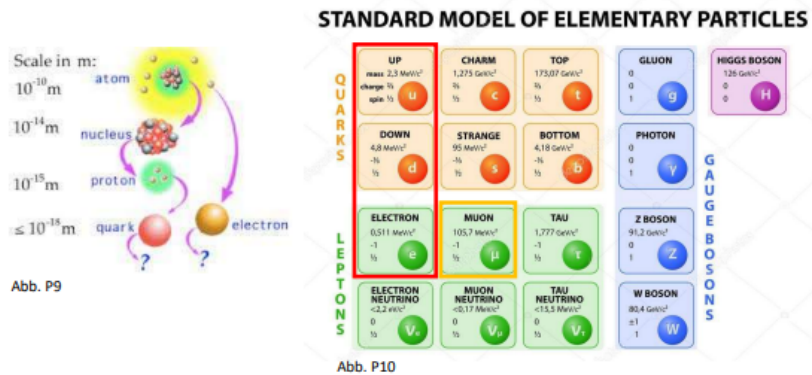


Abb. P8

- Was sind die fundamentalen Bausteine der Materie?
- Welche fundamentalen Kräfte / Wechselwirkungen existieren?

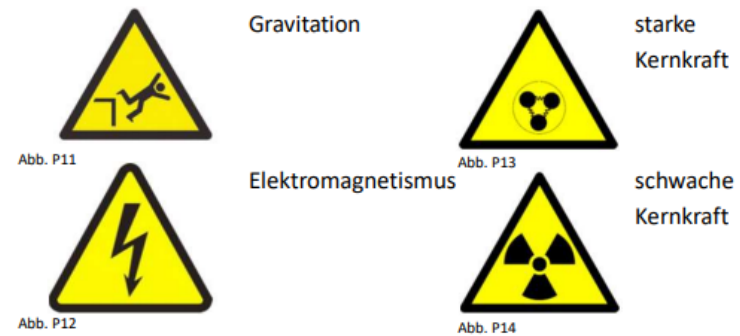
8

## Standardmodell der Elementarteilchen



9

## Fundamentale Wechselwirkungen

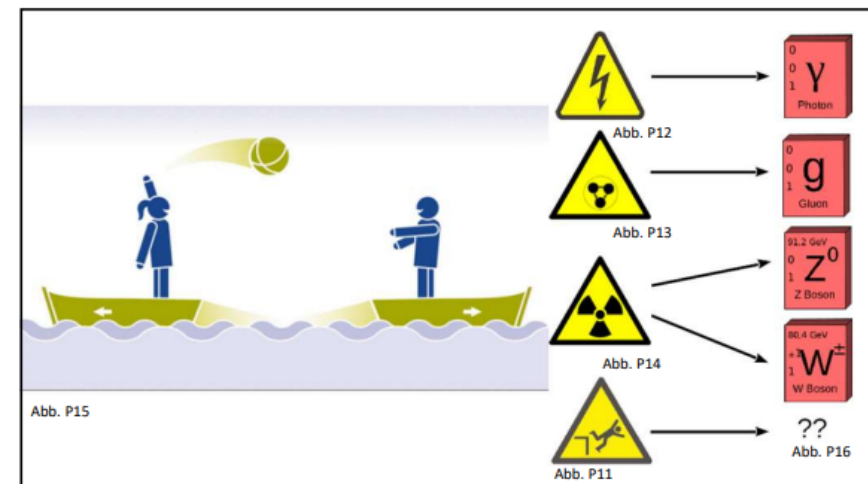


10

## Wie funktionieren die Wechselwirkungen?

- nicht jedes Elementarteilchen ist an jeder Wechselwirkung beteiligt
- Zu jeder Wechselwirkung gehört ein Austauscheteilchen und eine Ladung

11



12

	I	II	III	
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	125,9 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
Name	u up	c charm	t top	Y Photon
				H Higgs Boson
Quarks				
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g Gluon
	<2 eV	<10,18 MeV	<18,2 GeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	$\nu_e$ Elektron-Neutrino	$\nu_\mu$ Myon-Neutrino	$\nu_\tau$ Tau-Neutrino	$Z^0$ Z Boson
Leptonen				
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	+1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e Elektron	$\mu$ Myon	$\tau$ Tau	$W^\pm$ W Boson

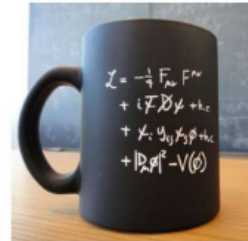
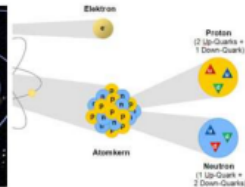
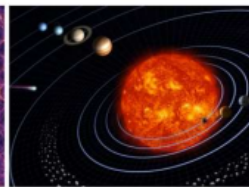
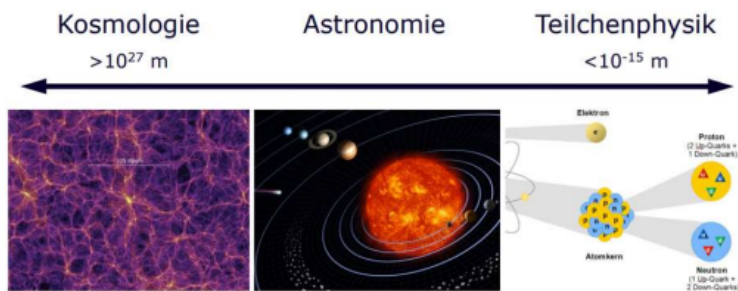


Abb. P17

[illegible]

Abb. P18

13



## WARUM?

Kosmische Strahlung  
-> Messe Teilchenstrahlung zur Untersuchung des Universums

15

# Astroteilchenphysik

- nutzt Teilchenphysik, um das Weltall zu erforschen
- Phänomene auf sehr großen Längenskalen sollen mit sehr kleinen Objekten beschrieben werden
- Forschungsgegenstand: Kosmische Strahlung

16



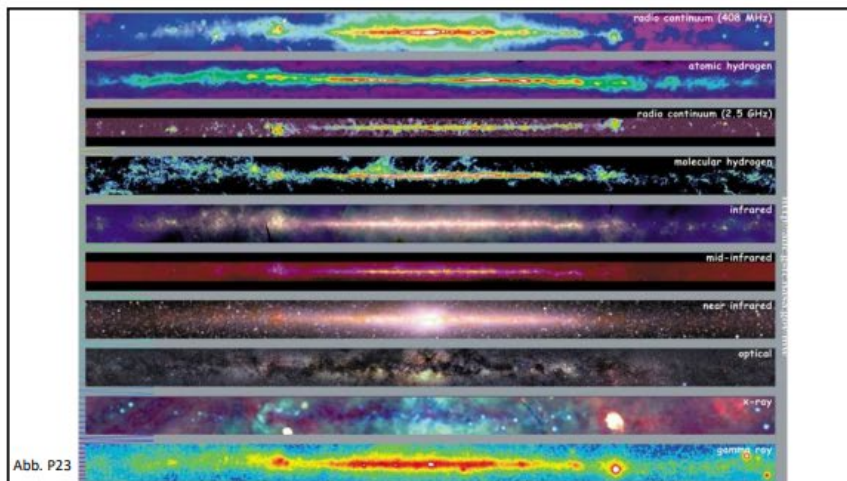
## Übung – Grundlagen der Astroteilchenphysik

- Fasse den bisherigen Inhalt mündlich zusammen.
- Löse die Aufgaben auf dem Arbeitsblatt 1

17



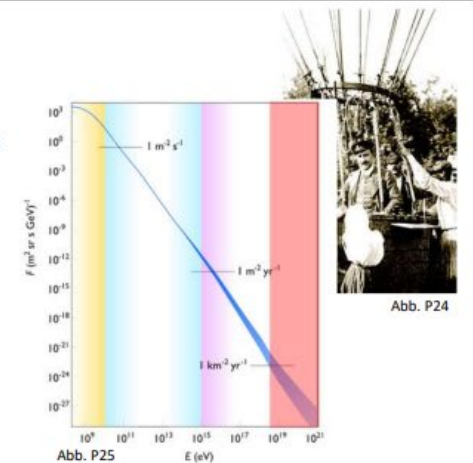
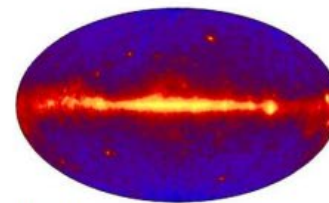
18



19

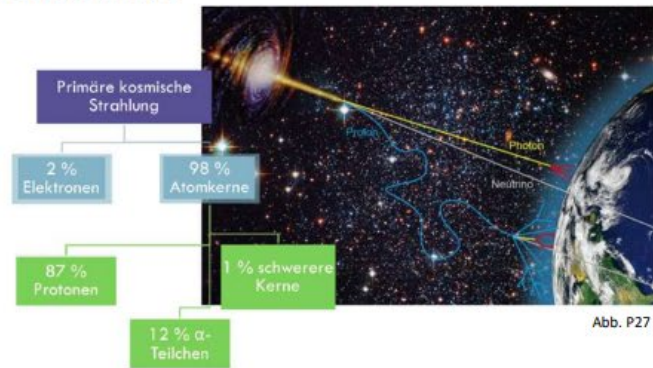
## Entdeckung

- 1911 durch Viktor Franz Hess
- Ballonfahrt in 5000 m Höhe



20

## Bestandteile



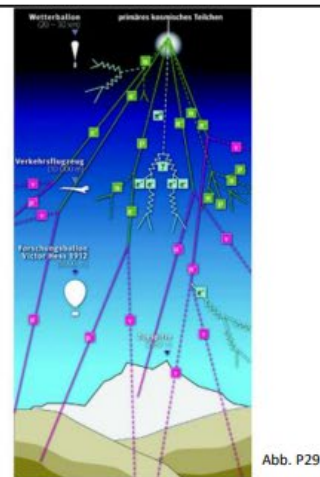
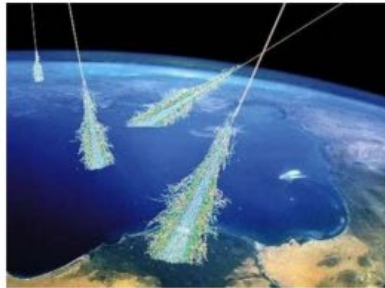
21

## Was passiert wenn kosmische Teilchen auf die Erde treffen?

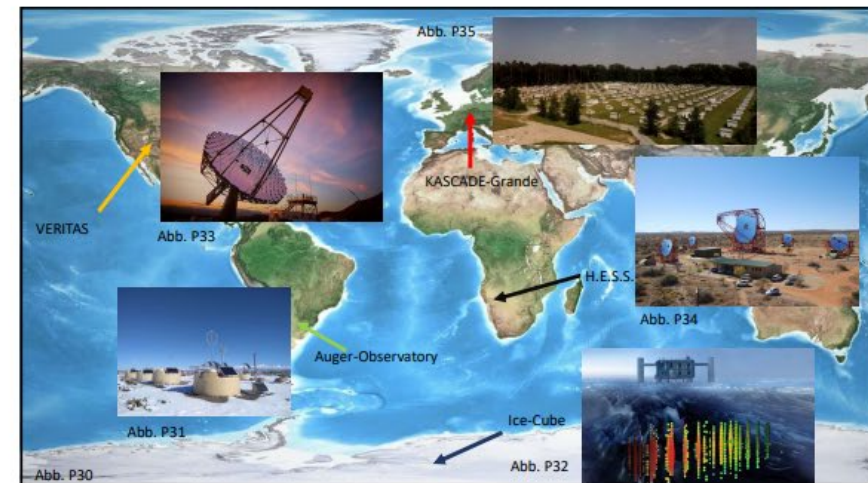


22

## Teilchenschauer



23



24



## Nebelkammer

- Nachweisinstrument für elektrisch geladene Teilchen
- entwickelt in den 1920ern

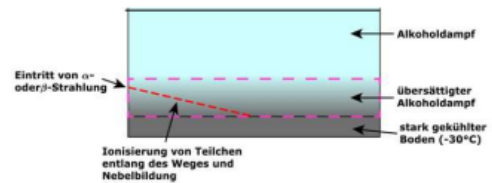


Abb. P36

25

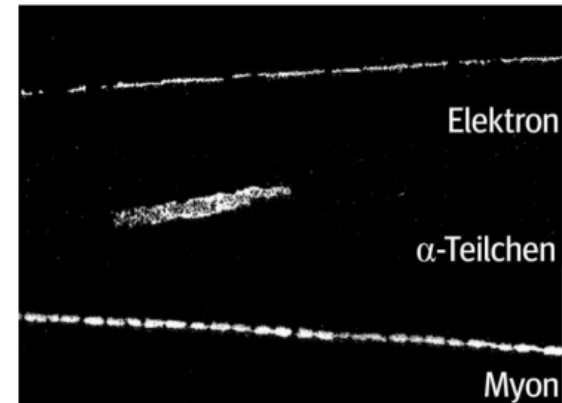


Abb. P37

Abb. P38

Abb. P39

26



Abb. P40



Abb. P41

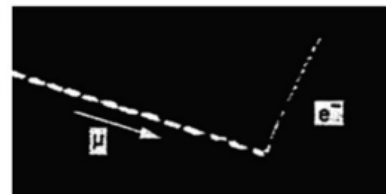
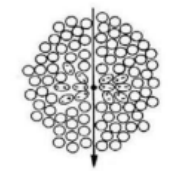


Abb. P42

27

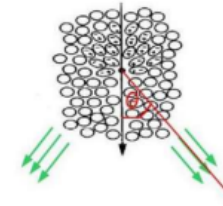
## Wie wird kosmische Strahlung detektiert?

- Immer gleiches Prinzip: Tscherenkow-Effekt



kleiner als  
Lichtgeschwindigkeit

Abb. P43



größer als  
Lichtgeschwindigkeit

Wasser, Luft, Eis



Abb. P44

28

### Umwandeln des Lichtsignals in ein elektrisches Signal

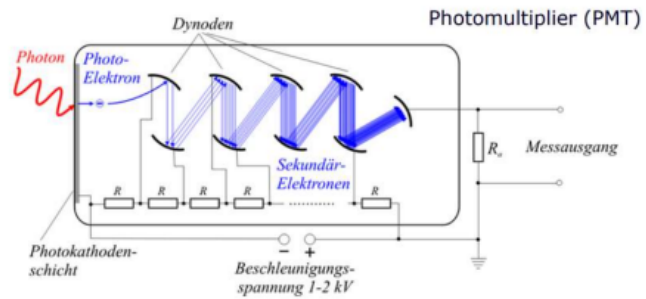


Abb. P45

29

### Auger-Observatorium



Abb. P46

Abb. P47

30

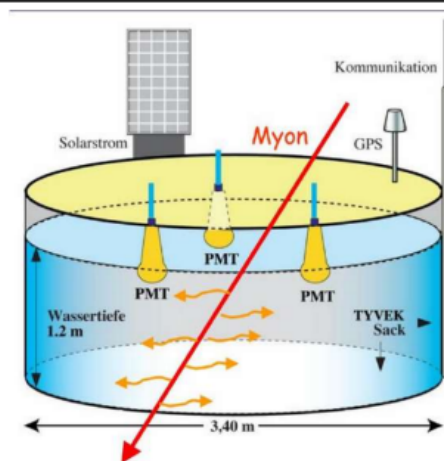


Abb. P48

31

### Übung – Kosmische Strahlung

- Fasse den Inhalt mündlich zusammen.
- Löse die Aufgaben auf Übungsblatt 2.

32

## Wiederholung: Arbeiten mit Diagrammen

Rolle von Diagrammen in der Wissenschaft:

- Lies dir den beigefügten Text durch und beantworte anschließend Aufgabe 1 auf Übungsblatt 3.

33

## Diagrammtypen

xy-Diagramm

- Verwendung
  - Veranschaulichung der Abhängigkeit/Beziehung zweier Variablen
  - Identifizierung von Mustern, Trends und Korrelationen zwischen Messdaten
- Achsen
  - x-Achse: unabhängige Variable (physikalische Größe)
  - y-Achse: abhängige Variable (physikalische Größe)
- Anwendung
  - in Physik: Analyse von Experimentierdaten
  - Entwicklung einer Größe in Abh. Von der Zeit
  - Finanzdaten etc.

34

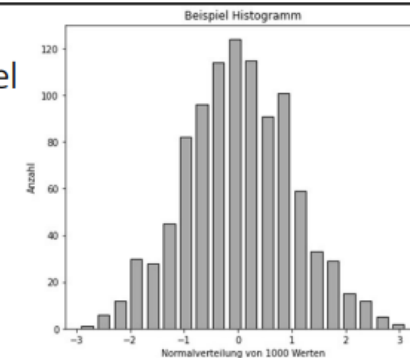
## Diagrammtypen

1D-Histogramm

- Verwendung
  - Analyse der Datenverteilung innerhalb eines Messintervalls
  - Darstellung der abs. Häufigkeit von Datenpunkten in verschiedenen Klassen/Intervallen
- Achsen
  - x-Achse: Klassen/Intervalle der Variable
  - y-Achse: abs. Häufigkeit der Merkmalsausprägung
- Anwendung
  - häufig in Statistik
  - Marktforschung und Qualitätskontrolle

35

## Histogramm - Beispiel



Nenne zwei andere Diagrammtypen.

Abb. P49

Erkläre deren Aufbau und Besonderheiten.

36

## Vorgehensweise beim Auswerten von Diagrammen

Schritt 1: Diagramm einordnen  
(Typ, Kontext, Titel, Achsenbeschriftungen, Formelzeichen, Einheit)

Schritt 2: Messwerte beschreiben  
(Trends, Verlauf des Graphen, markante / besondere Punkte, Proportionalität)

Schritt 3: Einordnen in physikalisches Hintergrundwissen  
(Erklärung der Messwerte durch ein physikalisches Modell)

Schritt 4: ggf. Vergleich mit anderen Diagrammen + neue Fragen stellen

37

## Arbeiten mit Cosmic@Web

- Scanne den folgenden QR-Code



38

39

## Cosmic@Web

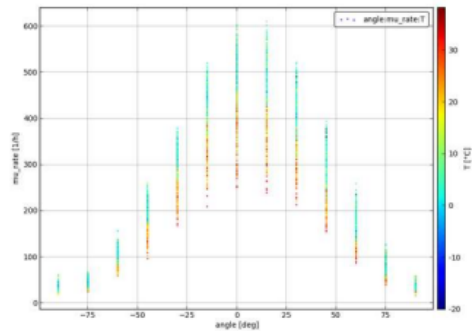
Aufgaben zum Einstieg:

1. Schau dir das Erklärvideo an.
2. Beginne das Tutorial. Mache dir dabei Notizen zum Ablauf der Diagrammerstellung.

40

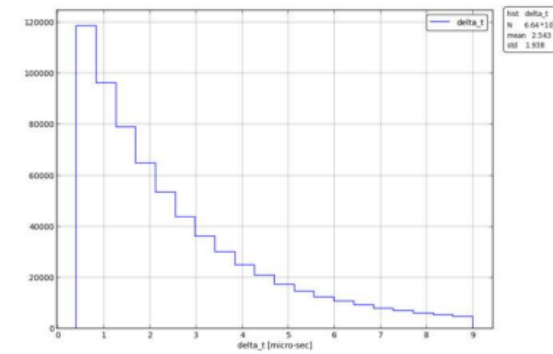
## Datenauswertung mit Cosmic@Web

1. Bearbeite die Aufgaben zum Protokoll: Ankunftsrichtung von Myonen.



41

2. Bearbeite die Aufgaben zum Protokoll: mittlere Lebensdauer von Myonen.



42

Wieso können wir Myonen auf der Erde messen?

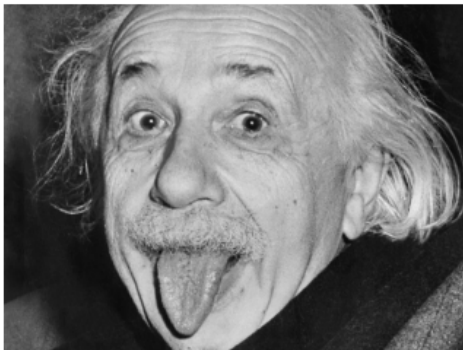


Abb. P51

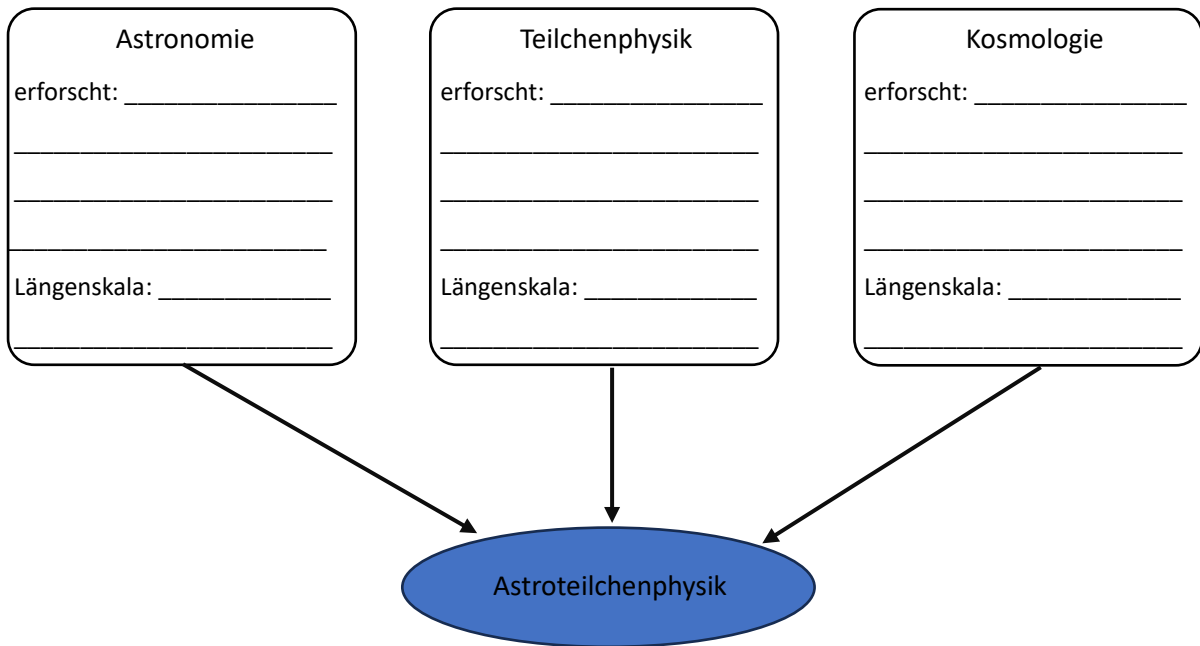
43

#### **A.4    Arbeitsblätter samt Musterlösungen**

# Astroteilchenphysik

## Arbeitsblatt 1: Grundlagen

**Aufgabe 1:** Ergänze die folgende Übersicht.



Forschungsgegenstand: \_\_\_\_\_

**Aufgabe 2:** Entscheide, ob die folgenden Aussagen zum Standardmodell der Elementarteilchen wahr oder falsch sind. Kreuze das entsprechende Feld an.

		richtig	falsch
1.	Materie besteht aus drei Sorten von Elementarteilchen: Up-Quarks, Down-Quarks und Elektronen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2.	Zu jeder fundamentalen Wechselwirkung existiert ein sogenanntes Botenteilchen. Diese wurden bereits alle nachgewiesen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3.	Das Photon ist das Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4.	Ein Proton besteht aus einem up-Quark und einem down-Quark.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5.	Bei dem Myon handelt es sich um ein „schwereres Elektron“.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Aufgabe 3:** Ordne die Beispiele jeweils einer der vier fundamentalen Wechselwirkungen zu, indem du sie miteinander verbindest.

starke Wechselwirkung

schwache Wechselwirkung

elektromagnetische Wechselwirkung

Gravitation

Wasserstoffbombe

Planetenbewegung

Zusammenhalt der  
Atomkerne

Muskelkraft

Schwerkraft

Chemische Reaktionen



## Arbeitsblatt 2: Kosmische Strahlung

Bei der kosmischen Strahlung, die im 20. Jahrhundert von \_\_\_\_\_ entdeckt wurde, handelt es sich um eine aus elektrisch geladenen Teilchen bestehende Strahlungsart. Dabei wird zwischen primärer und \_\_\_\_\_ Strahlung unterschieden. Die hochenergetische primäre Strahlung besteht dabei zu 98% aus \_\_\_\_\_, dazu zählen \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, aber auch \_\_\_\_\_. Wenn diese aus dem Weltall stammenden Teilchen auf die Erdatmosphäre treffen, wechselwirkt die kosmische Strahlung mit den Luft-Molekülen und es entstehen \_\_\_\_\_ Teilchen, wie zum Beispiel \_\_\_\_\_. Diese können auf der Erde mit verschiedenen Messinstrumenten nachgewiesen werden. In den 1930er Jahren verwendete man für den Nachweis dieser Teilchen eine \_\_\_\_\_. Die elektrisch geladenen kosmischen Teilchen ionisierten Alkohol-Moleküle und ein Nebelstreifen zeigte die Teilchenspur an. In der heutigen Zeit nutzt man für den Nachweis \_\_\_\_\_. Über den \_\_\_\_\_-Effekt und Photomultiplier können viele Eigenschaften der Teilchen bestimmt werden, wie zum Beispiel deren Energie oder möglicher Herkunftsort.

[illegible]

# Astroteilchenphysik

## Arbeitsblatt 3: Arbeiten mit Diagrammen

# Astroteilchenphysik


## Arbeitsblatt 3: Arbeiten mit Diagrammen

### Aufgabe 1:

Erläutere die Rolle von Diagrammen in der Wissenschaft.

[illegible]

### Aufgabe 2:

Name	xy-Diagramm	1D-Histogramm	
Definition / Eigenschaften			
Besonderheiten			
Abbildung			
Anwendungsbereiche			

### Aufgabe 3:

Welche Schritte sind dabei zu beachten?

A large grid of graph paper with 20 columns and 10 rows. The grid is composed of small squares, with a slightly larger square at the top left corner, likely for a title or header. The grid is empty and ready for use.

# Astroteilchenphysik

## Protokoll: Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen

# Astroteilchenphysik

## Protokoll: Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen

**Aufgabenstellung:**

**Aufgabenstellung:** Untersuche mit dem Experiment „CosMO-Mühle“ die Ankunftsrichtung von Myonen.

### Theoretische Vorüberlegungen:

**Theoretische Vorüberlegungen:** Beantworte die folgenden Aufgaben.

**Aufgabe 1** Erstelle einen Steckbrief zum Myon. Folgende Punkte sollten dabei beachtet werden:  
elektrische Ladung, Masse im Vergleich zum Elektron, Aussehen der Spur in der Nebelkammer und an welchen Wechselwirkungen nimmt es teil?

[illegible]

## Aufgabe 2

Benenne den Entdecker der kosmischen Strahlung. Erläutere die Nachweismethode von elektrisch geladener Teilchenstrahlung im 20. Jahrhundert stichpunktartig.

[illegible]

### Aufgabe 3

Eine der größten Forschungsanlagen der Welt, das Auger-Observatorium, benutzt Wassertanks als Flüssigszintillator für die Untersuchung kosmischer Strahlung. Die Funktionsweise der Szintillatoren kann über den Tscherenkow-Effekt beschrieben werden. Erkläre stichpunktartig diesen Effekt.

[illegible]





# Astroteilchenphysik

## Protokoll: Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen

# Astroteilchenphysik

## Protokoll: Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen

**Aufgabenstellung:**

**Aufgabenstellung:** Bestimme mit dem Experiment „LiDO“ die mittlere Lebensdauer eines Myons.

**Theoretische Vorüberlegungen:** Löse die folgenden Aufgaben

### Aufgabe 1: Myonen-Zerfall (Feynman-Diagramm)

Feynman-Diagramme sind eine Möglichkeit, um die Umwandlung von Elementarteilchen möglichst anschaulich darzustellen. Für das „richtige“ Lesen eines solchen Diagramms muss der linksstehende Pfeil beachtet werden, der den zeitlichen Verlauf angibt. Die Pfeile innerhalb des Diagramms dienen nur zur Kennzeichnung der einzelnen Elementarteilchen und sind in diesem Fall nicht weiter von belangen.

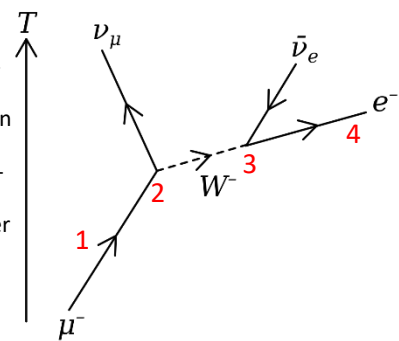


Abb. 1: Feynman-Diagramm

In Abb. 1 ist der Zerfall eines Myons dargestellt, wie er auch in diesem Experiment (im Szintillator) stattfindet. Ordne die in Abb. 1 eingefügten Zahlen (rot) den richtigen Aussagen zu, indem du die Zahlen in die entsprechenden Kreise schreibst.

- ☐ Das Myon wandelt sich in ein  $W^-$ -Boson und ein Myon-Neutrino um.

- Das Myon dringt in den Flüssigszintillator ein und erzeugt einen ersten Lichtblitz. .

- ☐ Das  $W^-$ -Boson wandelt sich nach kurzer Zeit in ein Elektron und ein Anti-Elektronneutrino um.

- ☐ Das Teilchen erzeugt einen zweiten Lichtblitz.

Definiere den Begriff „mittlere Lebensdauer“.

[illegible]

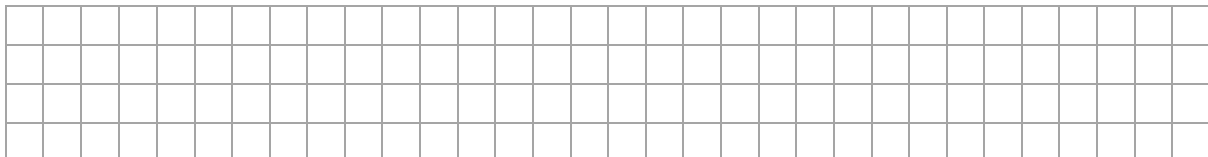
## Aufgabe 2: Fit-Funktion

Für das Ableiten von Gesetzmäßigkeiten aus physikalischen Experimentierdaten wird oftmals eine Fit-Funktion bzw. eine Regressionsfunktion verwendet. Dabei handelt es sich um einen Funktionsgraph, der möglichst gut mit den aufgenommenen Messwerten übereinstimmt. Diese Vorgehensweise sollst du nun einmal selbst durchführen. Dafür steht die folgende Messwerttabelle zur Verfügung.

x	1,5	2,4	3,5	4,6	5,7	6,5	7,3
y	0	8,5	15,1	17,2	14,9	10,5	3,8

Nutze deinen Taschenrechner, um die Messpunkte zunächst graphisch darzustellen. Ermittle anschließend unter Nutzung deines Taschenrechners eine Funktionsgleichung für die Fit-Funktion. Gib diese an. Beschreibe dein Vorgehen beim Ermitteln der Funktionsgleichung stichpunktartig.

*Hinweis: Beschreibe den Verlauf der Messpunkte. Welcher Funktionstyp kommt für die Fit-Funktion in Frage?*



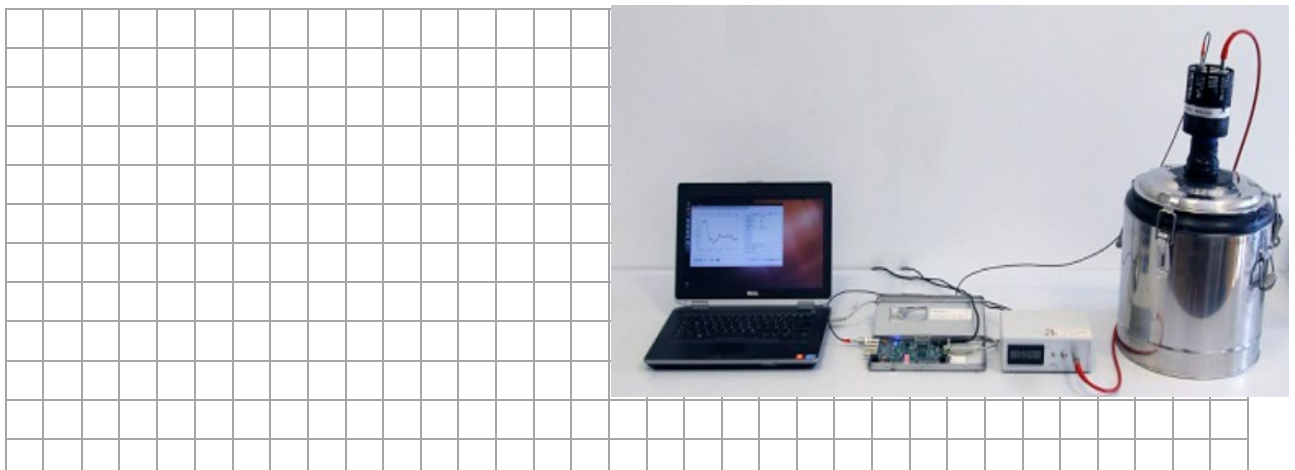
## Hilfestellung: Exponentialfunktion

Zerfallsprozesse werden in der Physik durch Exponentialfunktionen der Form  $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  beschrieben. Du kannst den unten aufgeführten Link aufrufen, um den Einfluss der einzelnen Parameter auf den Graphen zu erklären.

<https://www.geogebra.org/m/JyxgvZU7#:~:text=Eine%20Exponentialfunktion%20ist%20abh%C3%A4ngig%20von,anderem%20%C3%BCber%20Wachstum%20oder%20Zerfall.>

## Versuchsaufbau:

Beschreibe den Versuchsaufbau. Nutze dafür die zur Verfügung stehenden Informationen auf der Cosmic@Web-Seite. Benenne die Materialien, welche für dieses Experiment benötigt werden.



## Datenauswertung

**Durchführungsbeschreibung:**

Der Zerfall von Elementarteilchen ist ein statistischer Prozess, welcher über ein Zerfallsgesetz der Form  $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  beschrieben werden kann.  $\lambda$  ist dabei die Zerfallskonstante. Die mittlere Lebensdauer eines Myons  $\tau$  kann über die folgende Formel berechnet werden:  $\tau = \frac{1}{\lambda}$

Nun soll die mittlere Lebensdauer eines Myons bestimmt werden. Dafür nutzt man die Zeitdifferenz zwischen den Lichtblitzen, die mit  $\Delta t$  (delta\_t) bezeichnet wird. Ziel ist es zu bestimmen, wie oft eine bestimmte Zeitdifferenz gemessen wurde und dies mit einem **geeigneten Diagrammtyp** zu veranschaulichen.

### Aufgabe 4

Erstelle mit Hilfe von Cosmic@Web ein geeignetes Diagramm , in dem die Häufigkeiten der gemessenen Zeitdifferenzen dargestellt sind. Verwende dafür den Datensatz „2021\_L – muon life time“. Begründe kurz die Wahl des Diagrammtyps. Speichere das Diagramm als PDF-Dokument ab und wähle einen passenden Diagrammtitel.

[illegible]

### Aufgabe 5

Interpretiere das von dir erstellte Diagramm.

[illegible]

## Aufgabe 6

Wähle mindestens vier geeignete Messpunkte aus. Trage deren Koordinaten in die folgende Messwerttabelle ein.

$\Delta t$ in s							
Häufigkeit							

Gib eine Funktionsgleichung für eine passende Fitfunktion an. Ermittle über die Zerfallskonstante  $\lambda$  nun die mittlere Lebensdauer mit  $\tau = \frac{1}{\lambda}$ .

[illegible]



## Aufgabe 7

Aus dem Experiment „CosMO-Mühle“ kann man die Geschwindigkeit eines Myons ermitteln, indem man die Zeit zwischen den beiden Lichtblitzen misst, die entstehen, wenn das Myon die zwei Detektorplatten mit konstanter Geschwindigkeit durchquert. Die beiden Detektorplatten haben einen Abstand von 2,8 m und die Zeitdifferenz zwischen den Lichtblitzen liegt bei 9,40 ns. Berechne die Geschwindigkeit des Myons. Vergleiche die berechnete Geschwindigkeit mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

[illegible]

Mit der ermittelten Geschwindigkeit und die durch dieses Experiment ermittelte mittlere Lebensdauer kann nun die durchschnittliche Flugstrecke eines Myons ermittelt werden. Berechne diese Strecke. Was fällt auf?

### Erklärungsansatz:

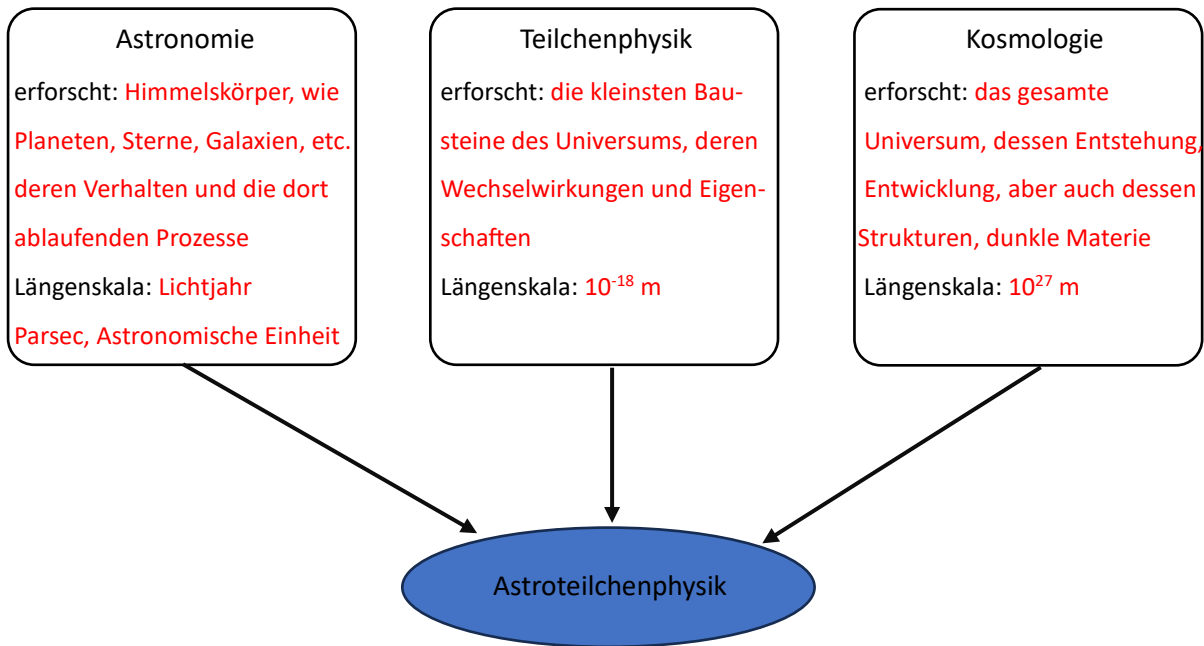
Finde einen möglichen Erklärungsansatz für diesen Widerspruch. Myonen entstehen in einer Höhe von 10 km. Wie kann es sein, dass wir Myonen auf der Erde messen/nachweisen können, die eigentlich nach einer durchschnittlichen Strecke von wenigen hundert Metern zerfallen?

[illegible]

# Astroteilchenphysik-Musterlösung

## Arbeitsblatt 1: Grundlagen

**Aufgabe 1:** Ergänze die folgende Übersicht.



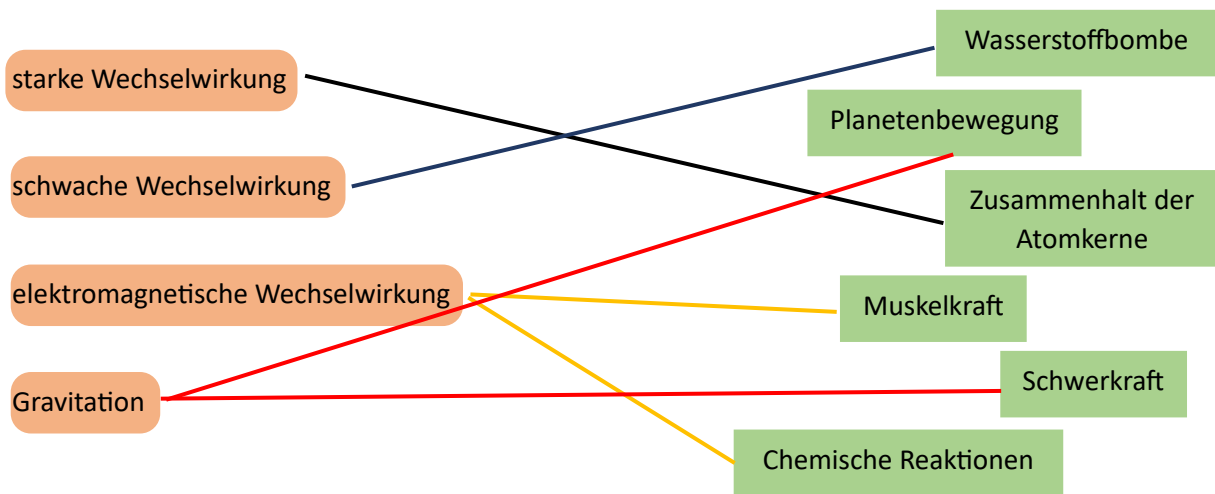
Forschungsgegenstand: die kosmische Strahlung und deren Eigenschaften

**Aufgabe 2:** Entscheide, ob die folgenden Aussagen zum Standardmodell der Elementarteilchen wahr oder falsch sind. Kreuze das entsprechende Feld an.

		richtig	falsch
1.	Materie besteht aus drei Sorten von Elementarteilchen: Up-Quarks, Down-Quarks und Elektronen.	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
2.	Zu jeder fundamentalen Wechselwirkung existiert ein sogenanntes Botenteilchen. Diese wurden bereits alle nachgewiesen.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
3.	Das Photon ist das Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
4.	Ein Proton besteht aus einem up-Quark und einem down-Quark.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
5.	Bei dem Myon handelt es sich um ein „schwereres Elektron“.	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Aufgabe 3:**

Ordne die Beispiele jeweils einer der vier fundamentalen Wechselwirkungen zu, indem du sie miteinander verbindest.



# Astroteilchenphysik-Musterlösung

## Arbeitsblatt 2: Kosmische Strahlung

### Aufgabe 1: Ergänze den folgenden Lückentext.

Bei der kosmischen Strahlung, die im 20. Jahrhundert von **Franz Viktor Hess** entdeckt wurde, handelt es sich um eine aus elektrisch geladenen Teilchen bestehende Strahlungsart. Dabei wird zwischen primärer und **sekundärer** Strahlung unterschieden. Die hochenergetische primäre Strahlung besteht dabei zu 98% aus **Atomkernen**, dazu zählen **Protonen**, **Alpha-Teilchen**, aber auch **schwerere Kerne**. Wenn diese aus dem Weltall stammenden Teilchen auf die Erdatmosphäre treffen, wechselwirkt die kosmische Strahlung mit den Luft-Molekülen und es entstehen **sekundäre** Teilchen, wie zum Beispiel **Myonen**. Diese können auf der Erde mit verschiedenen Messinstrumenten nachgewiesen werden. In den 1930er Jahren verwendete man für den Nachweis dieser Teilchen eine **Nebelkammer**. Die elektrisch geladenen kosmischen Teilchen ionisierten Alkohol-Moleküle und ein Nebelstreifen zeigte die Teilchenspur an. In der heutigen Zeit nutzt man für den Nachweis spezielle Tanks. Über den **Tscherenkow**-Effekt und Photomultiplier können viele Eigenschaften der Teilchen bestimmt werden, wie zum Beispiel deren Energie oder möglicher Herkunftsort.

### Aufgabe 2: Erkläre die Funktionsweise eines möglichen Nachweisinstruments für kosmische Strahlung. Nenne ein Experiment, bei dem dieses Instrument zum Einsatz kommt.

#### 1 Nebelkammer:

- Ein übersättigter Alkoholdampf wird stark gekühlt und erzeugt einen Nebel
- Elektrisch geladene Teilchen, wie zum Beispiel Myonen, stoßen mit den Alkohol-Molekülen zusammen und ionisieren diese
- Die ionisierten Alkohol-Teilchen wechseln vom gasförmigen in den flüssigen Aggregatzustand und der entstehende Nebelstreifen zeigt die Teilchenspur an
- Experimente: Nebelkammerexperimente (heute beispielsweise am CERN)

#### 2 Wasser-Tanks:

- Nachweis erfolgt über den Tscherenkow-Effekt: Teilchen, welche sich mit Überlichtgeschwindigkeit durch ein optisches Medium bewegen, bringen dieses zum leuchten
- Tscherenkow-Strahlung zeigt Menge und Energie der kosmischen Teilchen
- durch PMT wird die Information des Lichts in ein elektrisches Signal umgewandelt, welches vom Computer ausgewertet werden kann
- Experiment: Auger-Observatory, zum Nachweis von Myonen

# Astroteilchenphysik - Musterlösung


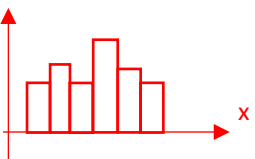

## Arbeitsblatt 3: Arbeiten mit Diagrammen

**Aufgabe 1:** Lies dir den beiliegenden Text durch.

Erläutere die Rolle von Diagrammen in der Wissenschaft.

Diagramme haben die wichtige Aufgabe komplexe Informationen zu visualisieren. Dadurch können Trends, Muster und Korrelationen erkannt werden. Auch dienen sie zur Präsentation der Forschungsdaten, was zur vereinfachten Kommunikation zwischen Wissenschaftlern\*innen und einem Publikum beiträgt.

**Aufgabe 2:** Ergänze die folgende Diagrammübersicht.

Name	xy-Diagramm	1D-Histogramm	Kreisdiagramm
Definition / Eigenschaften	besteht aus zwei Achsen, jede Achse beschreibt eine physikalische Größe mit der jeweiligen Einheit	besteht aus einer horizontalen Achse, auf vertikaler Skala ist absolute Häufigkeit eingetragen	Besteht aus Kreissektoren (Winkelanteile von 360°)
Besonderheiten	Untersuchen von Abhängigkeiten Abhängige Größe auf y-Achse, unabh. Größe auf x-Achse	Größe auf der x-Achse wird in Intervalle gegliedert und die abs. Häufigkeit eines Intervalls wird dargestellt → Häufigkeitsdiagramm	Diagramm gibt die relative Häufigkeit der einzelnen Merkmalsausprägungen wieder
Abbildung			
Anwendungsbereiche	Physik (s(t) oder I(U)-Diagramme), Mathematik	Physik, stat. Erhebungen z.B. im Sport	Statistische Untersuchung

**Aufgabe 3:** Ein wichtiger Bestandteil der Physik ist das Interpretieren von Diagrammen.

Welche Schritte sind dabei zu beachten?

1. Schritt: Einordnen des Diagramms (Bestimmung des Diagrammtyps, Titel, Kontext, Achsenbeschriftungen, Formelzeichen, Einheiten)
2. Schritt: Messwerte beschreiben (Verlauf des Graphen, Trends, Proportionalitäten, markante / besondere Punkte)
3. Schritt: Einordnen des Diagramminhalts in physikalischen Hintergrundwissen (Erklärung der Messwerte durch ein physikalisches Modell)
4. Schritt: ggf. Vergleich mit anderen Diagrammen und Entwickeln neuer Fragestellungen

# Astroteilchenphysik-Musterlösung

## Protokoll: Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen

### Aufgabenstellung:

Untersuche mit dem Experiment „CosMO-Mühle“ die Ankunftsrichtung von Myonen.

### Theoretische Vorüberlegungen:

Beantworte die folgenden Aufgaben.

**Aufgabe 1** Erstelle einen Steckbrief zum Myon. *Folgende Punkte sollten dabei beachtet werden: elektrische Ladung, Masse im Vergleich zum Elektron, Aussehen der Spur in der Nebelkammer und an welchen Wechselwirkungen nimmt es teil?*

Elektrische Ladung: einfach negativ ( $Q=-e$ )

Masse: schwerer als Elektron

Nebelkammerspur: gerade Spur (dicker als Elektron)

Wechselwirkungen: elektromagnetisch, schwach, Gravitation

### Aufgabe 2

Benenne den Entdecker der kosmischen Strahlung. Erläutere die Nachweismethode von elektrisch geladener Teilchenstrahlung im 20. Jahrhundert stichpunktartig.

Nebelkammer:

- ein übersättigter Alkoholdampf wird stark gekühlt und erzeugt einen Nebel
- elektrisch geladene Teilchen, wie zum Beispiel Myonen, stoßen mit den Alkohol-Molekülen zusammen und ionisieren diese
- Die ionisierten Alkohol-Teilchen wechseln vom gasförmigen in den flüssigen Aggregatzustand und der entstehende Nebelstreifen zeigt die Teilchenspur an
- Experimente: Nebelkammerexperimente (heute beispielsweise am CERN)

### Aufgabe 3

Eine der größten Forschungsanlagen der Welt, das Auger-Observatorium, benutzt Wassertanks als Flüssigszintillator für die Untersuchung kosmischer Strahlung. Die Funktionsweise der Szintillatoren kann über den Tscherenkow-Effekt beschrieben werden. Erkläre stichpunktartig diesen Effekt.

Jedes Material besitzt eine optische Dichte und eine für diesen Stoff spezielle Lichtgeschwindigkeit

Tscherenkow-Effekt tritt ein, wenn sich ein Teilchen mit Überlichtgeschwindigkeit durch den Stoff bewegt

Bsp: Myon im Wassertank

Stoff / Szintillator beginnt zu leuchten und die Menge des Lichts gibt Auskunft über Energie der Teilchen / Myonen



### Versuchsaufbau:

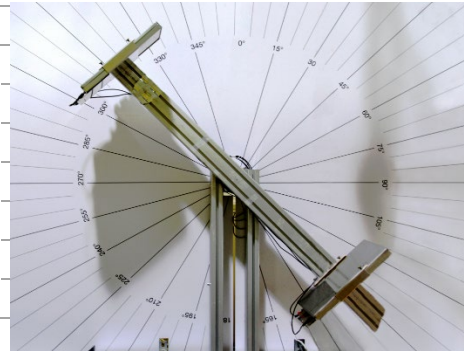
Nenne die für dieses Experiment benötigten Materialien.

Nutze dazu die Informationen auf der Internetseite.

Materialliste:

Abbildung:

- > zwei CosMO-Detektoren
- > einer DAQ-Karte,
- > einem Mühlenarm, an dessen Enden die beiden Detektoren im Abstand von 97 cm montiert sind,
- > einem Schrittmotor und der Elektronik für seine Steuerung,
- > einem Computer für die Datennahme und Steuerung der Winkelposition.



## Datenauswertung

### Durchführungsbeschreibung:

### Aufgabe 1

Erstelle mit Hilfe von Cosmic@Web ein geeignetes Diagramm, indem die gemessene Myonenrate in Abhängigkeit des Einfallswinkels dargestellt wird. Nutze dabei den Datensatz „2020\_M-rate per angle“. Speichere das erstellte Diagramm als PDF-Dokument ab und wähle einen dafür passenden Diagrammtitel.

**Aufgabe 2** Interpretiere das Diagramm.

Dargestellt ist die Abhängigkeit der gemessenen Myonenrate in der Einheit 1/h von dem Einfallswinkel. Dabei werden nur Myonen gemessen, wenn diese in beiden Detektorplatten registriert werden. Der Graph weist ein Maximum bei einem Winkel von  $\alpha=10^\circ$  auf, bei flacheren Winkeln ( $\alpha \rightarrow \pm 90^\circ$ ) nimmt die Myonenrate ab. Insgesamt ähnelt der Verlauf einer trigonometrischen Funktion, da neben dem Maximum auch zwei Minima erkannt werden können. (Bei Lernenden der 10. Klassenstufe ist eher davon auszugehen, dass diese den Verlauf als parabelförmig beschreiben). Dieses Phänomen kann über die zurückgelegte Strecke der Myonen in der Atmosphäre erklärt werden. Bei senkrechtem Einfall ( $\alpha=0^\circ$ ) ist die Strecke am kürzesten, die Wahrscheinlichkeit, dass Myonen mit Luftmolekülen zusammenstoßen und sich abregen ist also gering. Für flache Einfallswinkel ergibt sich eine große Flugstrecke, folglich stoßen die Myonen auf mehr Luftteilchen und regen sich durch Zusammenstöße ab, weshalb die Myonenrate geringer ist. Systematische Messunsicherheit entstehen durch die Ausdehnung der CosMO-Platten, weshalb nicht nur senkrecht einfallende Myonen gemessen werden, sondern auch Myonen mit einem ähnlichen Einfallswinkel.

### Aufgabe 3

Es soll nun der Einfluss einer weiteren physikalischen Größe auf die Myonenrate untersucht werden. Nutze dafür die Funktion `z-Variable` und setze dafür die Temperatur ein. Speichere das erstellte

Diagramm als PDF-Dokument ab und wähle einen dafür passenden Diagrammtitel. Beschreibe das Diagramm und gehe dabei auf Auffälligkeiten ein.

In dem xyz-Diagramm ist die Abhängigkeit der gemessenen Myonenrate von dem Einfallswinkel und von der Temperatur dargestellt. Grundsätzlich gleicht die Verteilung der Messdaten dem aus Aufgabe 2 erstellten Diagramm. Jedoch fällt auf, dass für konstante Einfallswinkel die Myonenrate mit höherer Temperatur abnimmt. Die höchste Rate wird unabhängig vom Winkel bei Temperaturen von ca.  $0^{\circ}\text{C}$  –  $15^{\circ}\text{C}$  gemessen. Der Grund hierfür liegt in der Temperatur, welche als Maß für die mittlere kinetische Energie / mittlere Geschwindigkeit der Luftteilchen aufgefasst werden kann. Je höher die Temperatur ist, desto schneller bewegen sich die Luftteilchen und stoßen umso heftiger mit den Myonen zusammen. Diese regen sich ab und die Myonenrate sinkt. Die vorhin beschriebene systematische Messunsicherheit kann ebenfalls hier angeführt werden.

**Schlussfolgerung:** Formuliere auf Basis der in den Diagrammen dargestellten Daten eine Aussage zur Ankunftsrichtung der Myonen.

Die Myonenrate hängt von zwei Variablen ab: des Einfallswinkels und der Temperatur.

Es gilt: Bei senkrechtem Einfall ist die Myonenrate am höchsten, bei flachen Einfallswinkeln ist sie am kleinsten.

Je höher die Temperatur ist, desto kleiner ist die Myonenrate.

#### Aufgabe 4

Nachdem die Ankunftsrichtung der Myonen bekannt ist, kann man sich nun der Frage nach den **Quellen der kosmischen Strahlung** widmen. Erstelle eine Übersicht zu den Quellen kosmischer Strahlung. Anhand welchen Kriteriums kann zwischen den verschiedenen Quellen unterschieden werden? (Für die Recherche kannst du den bereit gestellten Text oder dein Smartphone bzw. deinen Laptop benutzen)

Form und Struktur der Übersicht können sich unterscheiden. Folgende Inhalte sollten darin enthalten sein.

- Teilchen mit einer Energie von bis zu  $10^9$  eV stammen größtenteils von der Sonne. Der Sonnenwind und Sonneneruptionen beschleunigen die Teilchen, sodass sie unsere Erdatmosphäre erreichen können (siehe Abb. 15).
- Teilchenenergien von  $10^{10}$  bis  $10^{16}$  eV werden in galaktischen Quellen in der Milchstraße erzeugt. Als wahrscheinlichste Beschleuniger gelten Pulsare, Doppelsternsysteme und die Druckwellen von Supernovae (siehe Abb. 16).
- Teilchen mit Energien im Bereich  $10^{16}$  bis  $10^{20}$  eV sind sehr selten und werden extragalaktischen Quellen im Weltall zugewiesen. Mechanismen in aktiven Galaxienkernen könnten die Teilchen auf derartig hohe Energien beschleunigen. Wie Teilchen solch hohe Energien erreichen können und ob diese Energie eine obere Grenze darstellt, ist nicht eindeutig geklärt (siehe Abb. 17).



# Astroteilchenphysik

## Protokoll: Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen

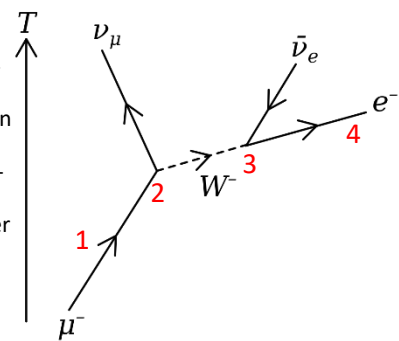
### Aufgabenstellung:

Bestimme mit dem Experiment „LiDO“ die mittlere Lebensdauer eines Myons.

### Theoretische Vorüberlegungen: Löse die folgenden Aufgaben

#### Aufgabe 1: Myonen-Zerfall (Feynman-Diagramm)

Feynman-Diagramme sind eine Möglichkeit, um die Umwandlung von Elementarteilchen möglichst anschaulich darzustellen. Für das „richtige“ Lesen eines solchen Diagramms muss der linksstehende Pfeil beachtet werden, der den zeitlichen Verlauf angibt. Die Pfeile innerhalb des Diagramms dienen nur zur Kennzeichnung der einzelnen Elementarteilchen und sind in diesem Fall nicht weiter von belangen.



In Abb. 1 ist der Zerfall eines Myons dargestellt, wie er auch in diesem Experiment (im Szintillator) stattfindet. Ordne die in Abb. 1 eingefügten Zahlen (rot) den richtigen Aussagen zu, indem du die Zahlen in die entsprechenden Kreise schreibst.

② Das Myon wandelt sich in ein  $W^-$ -Boson und ein Myon-Neutrino um.

① Das Myon dringt in den Flüssigszintillator ein und erzeugt einen ersten Lichtblitz. .

③ Das  $W^-$ -Boson wandelt sich nach kurzer Zeit in ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino um.

④ Das Teilchen erzeugt einen zweiten Lichtblitz.

Definiere den Begriff „mittlere Lebensdauer“.

**Schülergerechte Definition:** Bei der mittleren Lebensdauer handelt es sich um eine Größe, welche die durchschnittliche Zeit angibt, bis ein Myon zerfällt.

**Definition:** Teilchenumwandlungen sind ein statistischer Prozess. Folglich definiert man die mittlere Lebensdauer als die Zeit, in der sich ein bestimmter Anteil ( $\frac{1}{e}$ ) Myonen umgewandelt haben.

## Aufgabe 2: Fit-Funktion

Für das Ableiten von Gesetzmäßigkeiten aus physikalischen Experimentierdaten wird oftmals eine Fit-Funktion bzw. eine Regressionsfunktion verwendet. Dabei handelt es sich um einen Funktionsgraph, der möglichst gut mit den aufgenommenen Messwerten übereinstimmt. Diese Vorgehensweise sollst du nun einmal selbst durchführen. Dafür steht die folgende Messwerttabelle zur Verfügung.

x	1,5	2,4	3,5	4,6	5,7	6,5	7,3
y	0	8,5	15,1	17,2	14,9	10,5	3,8

Nutze deinen Taschenrechner, um die Messpunkte zunächst graphisch darzustellen. Ermittle anschließend unter Nutzung deines Taschenrechners eine Funktionsgleichung für die Fit-Funktion. Gib diese an. Beschreibe dein Vorgehen beim Ermitteln der Funktionsgleichung stichpunktartig.

*Hinweis: Beschreibe den Verlauf der Messpunkte. Welcher Funktionstyp kommt für die Fit-Funktion in Frage?*

Lage der Punkte ähnelt einer Parabel, folglich hat die Fit-Funktion die folgende Struktur:  $f(x) = ax^2 + bx + c$

Es folgende Funktionsgleichung ermittelt:  $f(x) = -1,81x^2 + 16,61x - 20,86$

(Beim Casio-ClassPad-TR bietet sich das Menü „Statistik“ zum Ermitteln der Gleichung an)

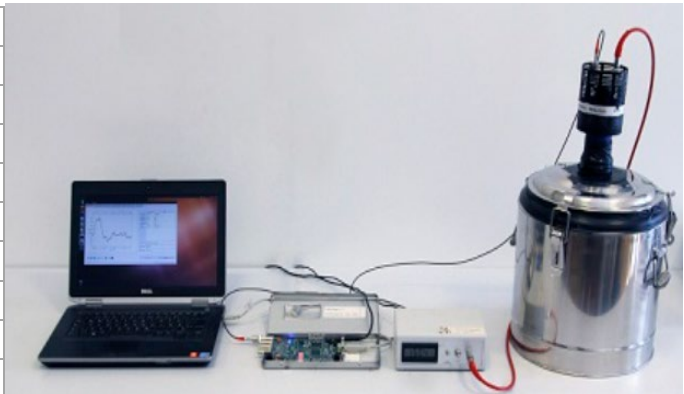
## Hilfestellung: Exponentialfunktion

Zerfallsprozesse werden in der Physik durch Exponentialfunktionen der Form  $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  beschrieben. Du kannst den unten aufgeführten Link aufrufen, um den Einfluss der einzelnen Parameter auf den Graphen zu erklären.

<https://www.geogebra.org/m/JyxgvZU7#:~:text=Eine%20Exponentialfunktion%20ist%20abh%C3%A4ngig%20von,anderem%20%C3%Bcber%20Wachstum%20oder%20Zerfall.>

## Versuchsaufbau:

Beschreibe den Versuchsaufbau. Nutze dafür die zur Verfügung stehenden Informationen auf der Cosmic@Web-Seite. Benenne die Materialien, welche für dieses Experiment benötigt werden.

<ul style="list-style-type: none"><li>&gt; einem lichtdichten, 12 Liter Stahlbehälter,</li><li>&gt; 12 Liter Flüssigszintillator,</li><li>&gt; einem PMT,</li><li>&gt; einer Hochspannungsversorgung für den PMT,</li><li>&gt; einer DAQ-Karte,</li><li>&gt; einem Computer zum Speichern der Daten.</li></ul>	
--	--

## Datenauswertung

### Durchführungsbeschreibung:

Der Zerfall von Elementarteilchen ist ein statistischer Prozess, welcher über ein Zerfallsgesetz der Form  $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  beschrieben werden kann.  $\lambda$  ist dabei die Zerfallskonstante. Die mittlere Lebensdauer eines Myons  $\tau$  kann über die folgende Formel berechnet werden:  $\tau = \frac{1}{\lambda}$

Nun soll die mittlere Lebensdauer eines Myons bestimmt werden. Dafür nutzt man die Zeitdifferenz zwischen den Lichtblitzen, die mit  $\Delta t$  (delta\_t) bezeichnet wird. Ziel ist es zu bestimmen, wie oft eine bestimmte Zeitdifferenz gemessen wurde und dies mit einem **geeigneten Diagrammtyp** zu veranschaulichen.

### Aufgabe 4

Erstelle mit Hilfe von Cosmic@Web ein geeignetes Diagramm, in dem die Häufigkeiten der gemessenen Zeitdifferenzen dargestellt sind. Verwende dafür den Datensatz „2021\_L – muon life time“. Begründe kurz die Wahl des Diagrammtyps. Speichere das Diagramm als PDF-Dokument ab und wähle einen passenden Diagrammtitel.

Diagrammtyp: Histogramm

Begründung: abs. Häufigkeiten der Zeitunterschiede sollen dargestellt werden

### Aufgabe 5

Interpretiere das von dir erstellte Diagramm.

In dem Histogramm ist die Verteilung der absoluten Häufigkeiten der Zeitdifferenzen zwischen den beiden Lichtblitzen dargestellt. Die Verteilung ähnelt einer Exponentialfunktion, im speziellen einem exponentiellen Zerfall. In der Physik werden Zerfallsprozesse über die Gleichung  $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  beschrieben. Folglich kann diese Formel als Grundlage für die Fitfunktion verwendet werden. Wichtig ist, dass die Größe delta\_t in der Einheit  $\mu s$  angegeben ist. Die mittlere Lebensdauer sollte folglich in ungefähr derselben Größenordnung liegen.

### Aufgabe 6

Wähle mindestens vier geeignete Messpunkte aus. Trage deren Koordinaten in die folgende Messwerttabelle ein.

$\Delta t$ in s	$0,9 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
Häufigkeit	119.000	95.000	79.000	65.000	52.500	42.500	37.500

Gib eine Funktionsgleichung für eine passende Fitfunktion an. Ermittle über die Zerfallskonstante  $\lambda$  nun die mittlere Lebensdauer mit  $\tau = \frac{1}{\lambda}$ .

$$f(x) = 161.809,624 \cdot e^{-4,4 \cdot 10^5 x}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4,4 \cdot 10^5} = 2,27 \cdot 10^{-6} s = 2,27 \mu s$$

### Aufgabe 7

Aus dem Experiment „CosMO-Mühle“ kann man die Geschwindigkeit eines Myons ermitteln, indem man die Zeit zwischen den beiden Lichtblitzen misst, die entstehen, wenn das Myon die zwei Detektorplatten mit konstanter Geschwindigkeit durchquert. Die beiden Detektorplatten haben einen Abstand von 2,8 m und die Zeitdifferenz zwischen den Lichtblitzen liegt bei 9,40 ns. Berechne die Geschwindigkeit des Myons. Vergleiche die berechnete Geschwindigkeit mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2,8 \text{ m}}{9,40 \text{ ns}} = \frac{2,8 \text{ m}}{9,40 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = 2,9787 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$
$$v = 0,9936 \cdot c$$

Mit der ermittelten Geschwindigkeit und die durch dieses Experiment ermittelte mittlere Lebensdauer kann nun die durchschnittliche Flugstrecke eines Myons ermittelt werden. Berechne diese Strecke. Was fällt auf?

$$v = \frac{s}{t} \rightarrow s = v \cdot t$$
$$s = 2,9787 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2,27 \mu\text{s} = 676,165 \text{ m}$$

Theoriewerte:  $\tau = 2,2 \mu\text{s}$ ,  $s = 655,314 \text{ m}$

### Erklärungsansatz:

Finde einen möglichen Erklärungsansatz für diesen Widerspruch. Myonen entstehen in einer Höhe von 10 km. Wie kann es sein, dass wir Myonen auf der Erde messen/nachweisen können, die eigentlich nach einer durchschnittlichen Strecke von wenigen hundert Metern zerfallen?

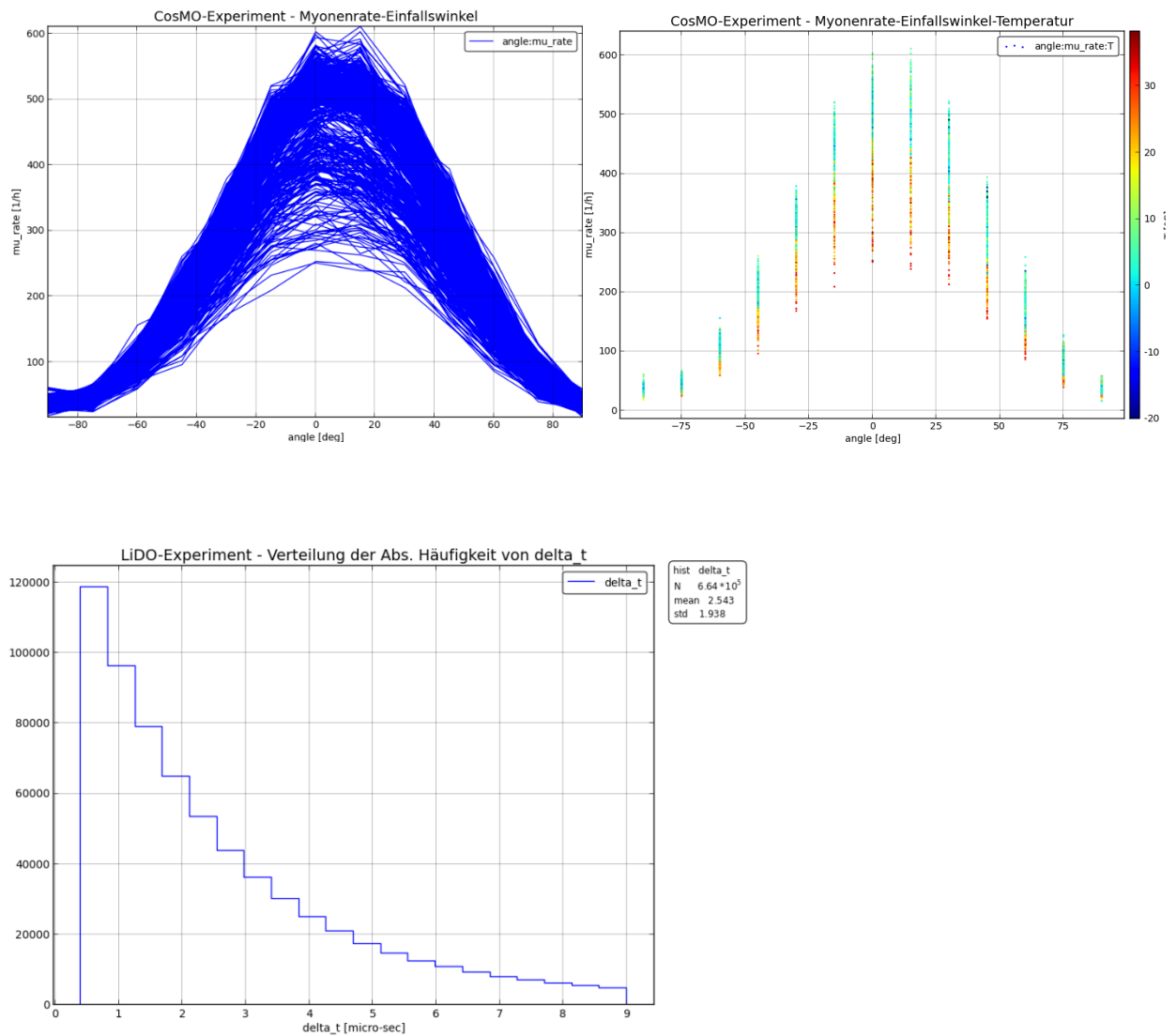
Bei der klassischen Betrachtung von Myonen stellt man fest, dass man am Erdboden eigentlich keine Myonen mehr detektieren könnte. Da wir es aber offensichtlich doch schaffen, muss also geschlussfolgert werden, dass Myonen nicht als Objekte der klassischen Physik beschrieben werden können.

Man stellt fest, dass sich Myonen mit 99% der Vakuumlichtgeschwindigkeit bewegen, folglich gelten für sie die Aussagen und Grundsätze der Relativitätstheorie.

Man kommt zu dem Schluss, dass zwei Phänomene für den Nachweis von Myonen erforderlich sind: Zeitdilation und Längenkontraktion.

Im Bezugssystem des Myons vergeht die Zeit entsprechend langsamer und die Flugstrecke schrumpft zusammen. Somit kann der Nachweis von Myonen ebenfalls als ein Indiz für die Richtigkeit der Relativitätstheorie angenommen werden.

## A.5 Musterdiagramme



## A.6 Ergänzende Materialien

### Diagramme in der Wissenschaft

Quelle: teilweise übernommen aus <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/diagramme-der-physik> (letzter Aufruf am: 12.12.2023)

Die wissenschaftlichen Disziplinen, wie Physik, Biologie und Chemie, fußen auf einem festen Kreislauf von Denk- und Arbeitsschritten. Beginnend mit theoretischen Vorüberlegungen, über das Aufstellen eines Experimentierplans mitsamt Hypothese, dem Erfassen der Messdaten und anschließender Auswertung bis hin zum Aufstellen einer Folgehypothese und dem Bestätigen oder Verwerfen einer Theorie – in all diesen Arbeitsschritten spielen Diagramme eine große Rolle.

Diagramme werden in der Wissenschaft genutzt, um komplexe Informationen visuell darstellen, und helfen, Muster, Beziehungen und Trends zu identifizieren. Diese visuellen Darstellungen sind in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen unverzichtbar und tragen wesentlich dazu bei, komplexe Daten verständlich zu machen.

In der Forschung dienen Diagramme dazu, experimentelle Ergebnisse zu präsentieren. Grafiken wie Linien- oder Balkendiagramme ermöglichen es, quantitative Daten anschaulich darzustellen. Dies vereinfacht nicht nur die Kommunikation zwischen Wissenschaftlern, sondern auch die Vermittlung von Forschungsergebnissen an ein breiteres Publikum. Diagramme bieten eine klare und prägnante Möglichkeit, Muster und Entwicklungen in den Daten zu erkennen.

In den Naturwissenschaften sind Diagramme in Experimenten unerlässlich, um komplexe Zusammenhänge zwischen Variablen zu verdeutlichen. Von der Physik über die Chemie bis zur Biologie helfen Diagramme, Modelle zu entwickeln und Hypothesen zu überprüfen. Sie bieten eine anschauliche Möglichkeit, abstrakte Konzepte und komplexe Experimente zu erklären.

## QUELLEN PRIMÄRER KOSMISCHER STRAHLUNG

Die kosmische Strahlung wurde zwar schon vor über 100 Jahren entdeckt, doch sind viele grundlegende Fragen auch heute nur teilweise geklärt oder noch unbeantwortet. So wird auch heute noch nach Quellen der kosmischen Strahlung gesucht und es werden die Beschleunigungsmechanismen, die solch hochenergetische Teilchen erzeugen, erforscht.

Die geladenen kosmischen Teilchen werden auf ihrem Weg von der Quelle zur Erde durch Magnetfelder abgelenkt. Deshalb kann man bei der Messung auf der Erde nicht mehr auf ihren Ursprungsort schließen. Anhand der Energie, die ein Teilchen der primären kosmischen Strahlung besitzt, können die Astroteilchenphysiker aber abschätzen, welches die wahrscheinlichsten Quellen sind. Es werden folgende drei Unterscheidungen getroffen:

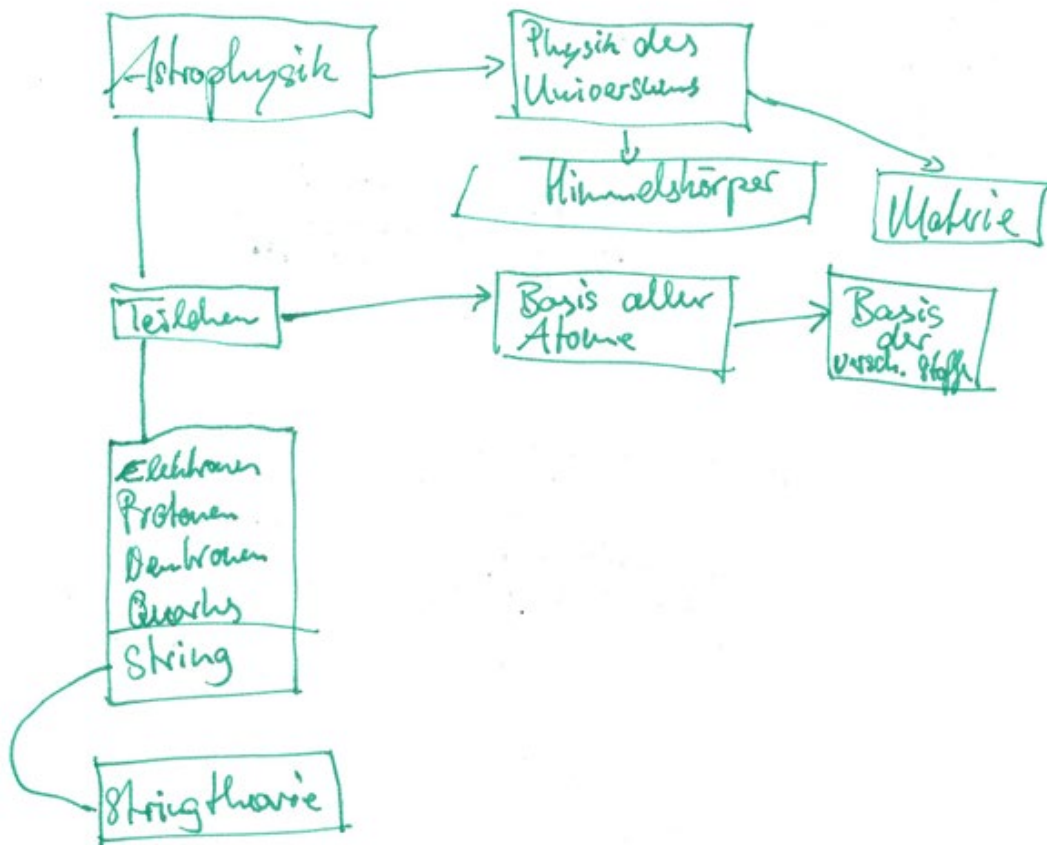
- Teilchen mit einer Energie von bis zu  $10^9$  eV stammen größtenteils von der Sonne. Der Sonnenwind und Sonneneruptionen beschleunigen die Teilchen, sodass sie unsere Erdatmosphäre erreichen können (siehe Abb. 15).
- Teilchenenergien von  $10^{10}$  bis  $10^{16}$  eV werden in galaktischen Quellen in der Milchstraße erzeugt. Als wahrscheinlichste Beschleuniger gelten Pulsare, Doppelsternsysteme und die Druckwellen von Supernovae (siehe Abb. 16).
- Teilchen mit Energien im Bereich  $10^{16}$  bis  $10^{20}$  eV sind sehr selten und werden extragalaktischen Quellen im Weltall zugewiesen. Mechanismen in aktiven Galaxienkernen könnten die Teilchen auf derartig hohe Energien beschleunigen. Wie Teilchen solch hohe Energien erreichen können und ob diese Energie eine obere Grenze darstellt, ist nicht eindeutig geklärt (siehe Abb. 17).

Quelle: Teilchenphysik – Unterrichtsmaterial ab Klasse 10, Joachim Herz Stiftung, S.24.

## A.7 Concept-Maps

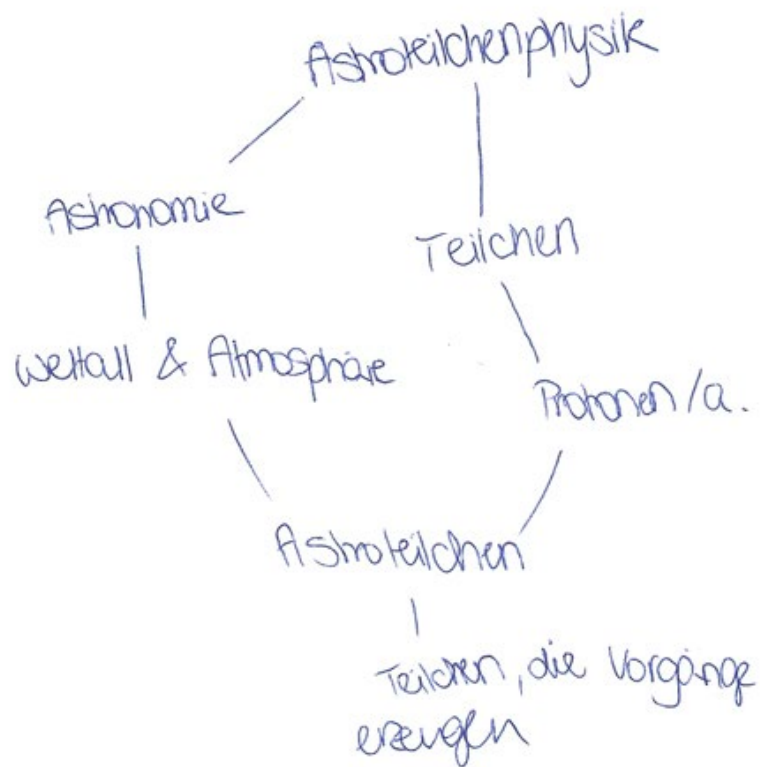
### a) Erfassung des Vorwissens

Schüler\*in1:

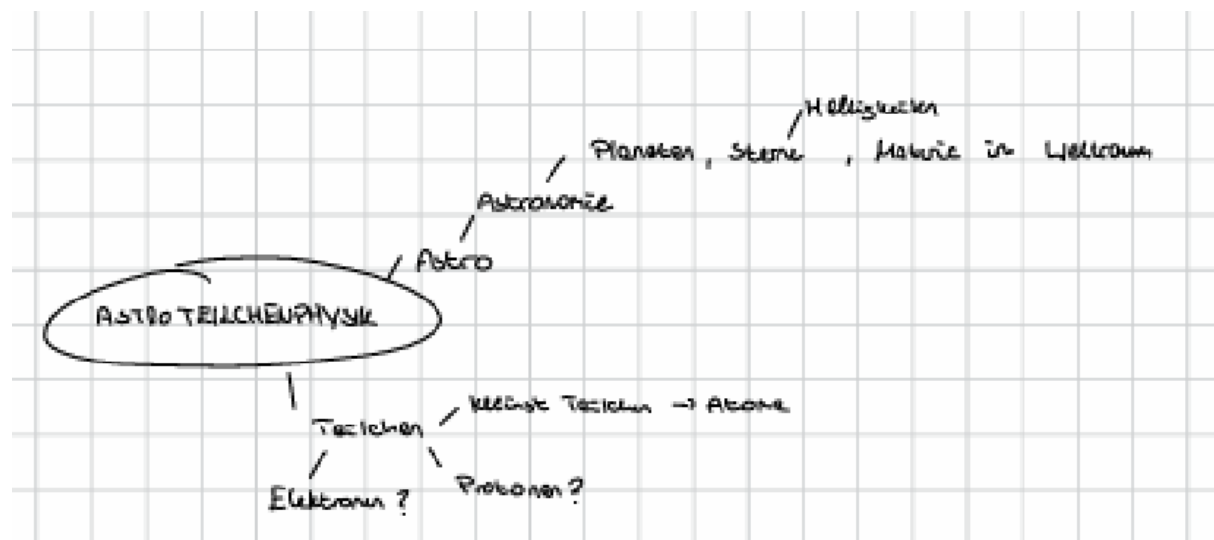




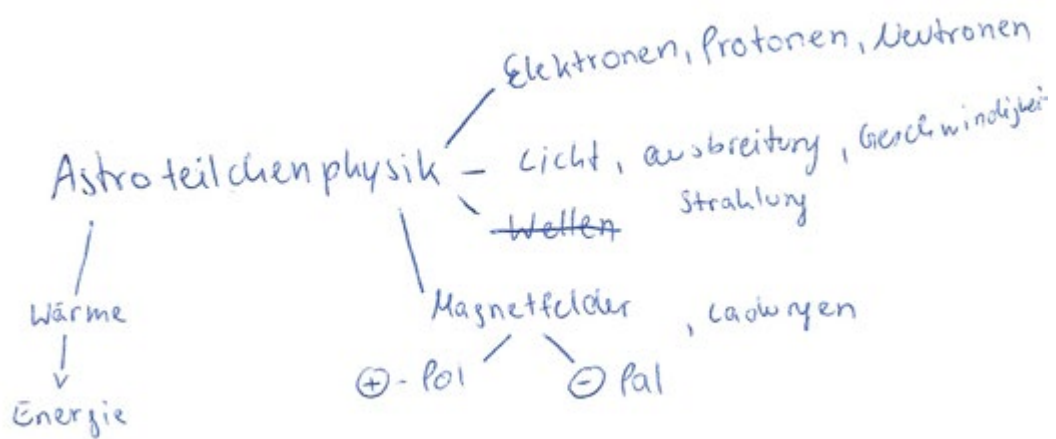
Schüler\*in 2:



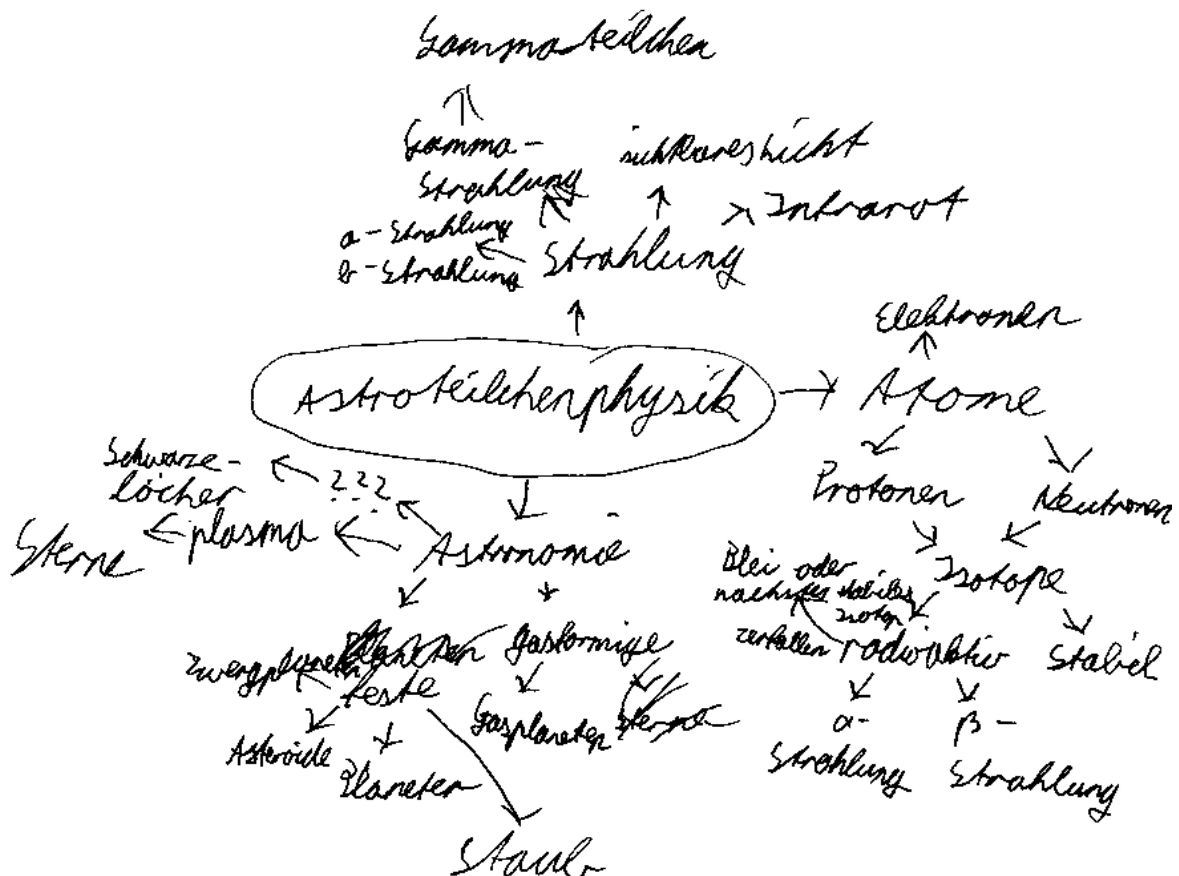
Schüler\*in 3:



Schüler\*in 4:



Schüler\*in 5:



Schüler\*in 6:



Schüler\*in 7:

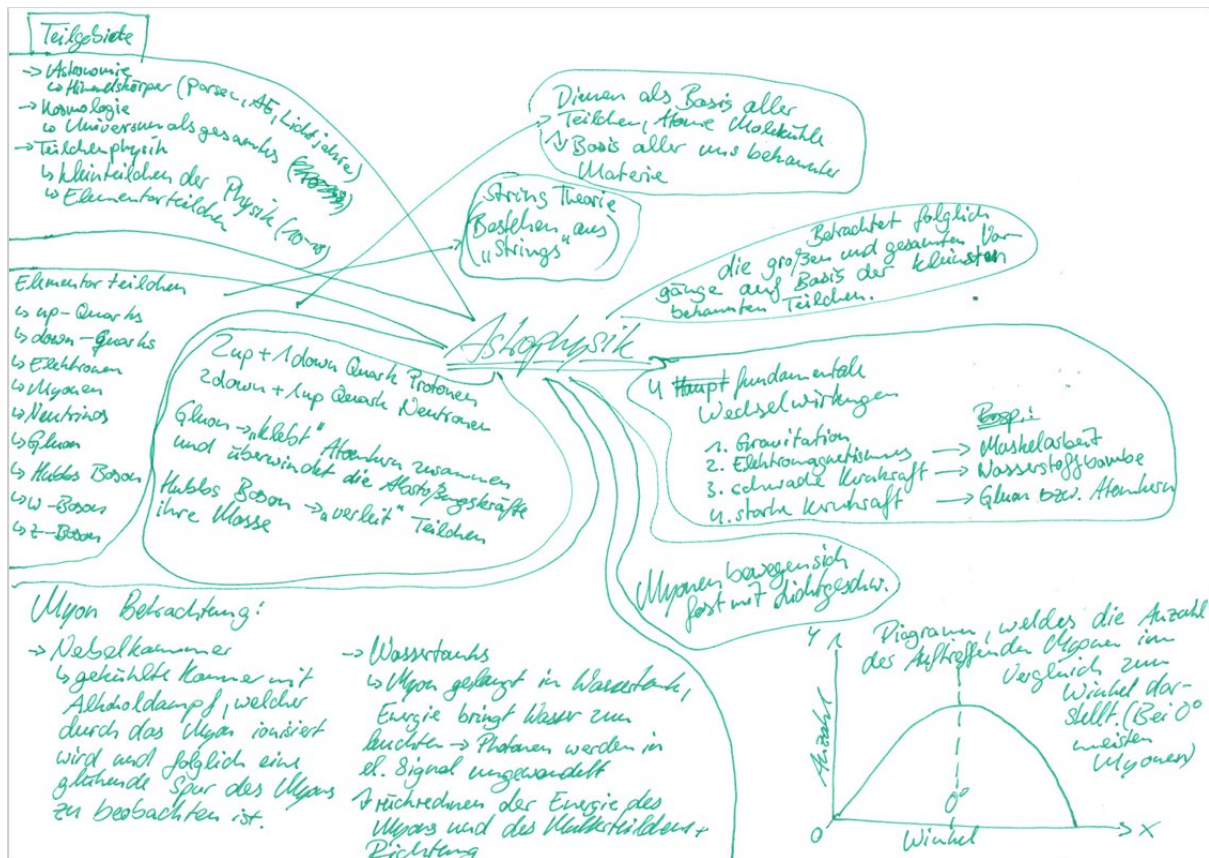
Teilchen: Moleküle  
Atome  
Quanten ↓

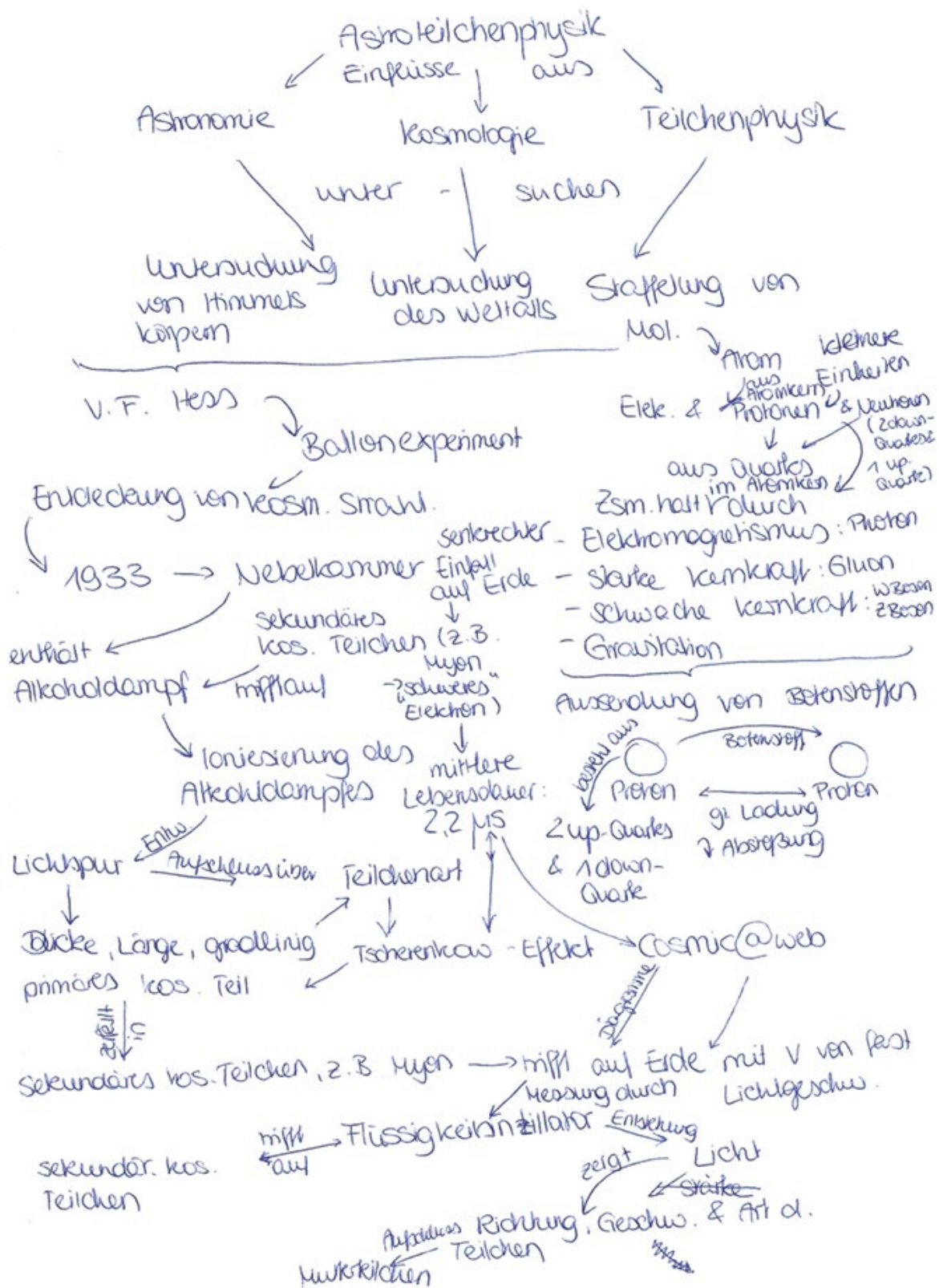
Astro: Astronomie

Quanten → kleinste Teilchen → übertragen Infos von a nach b & schnellste „Geschwindigkeit“  
↓  
Quantenverschränkung

## b) Erfassung des Wissensstandes nach Durchführung der Teaching Experiments

Schüler\*in 1:







```

graph TD
    A[Astroteilchenphysik] --> B[Kosmologie]
    A --> C[Astronomie]
    A --> D[Teilchenphysik]
    
    B --> B1[Universum, Ursprung, dunkle Materie]
    B1 --> B2[Hess: Kosmische Strahlung]
    B2 --> B3[primär]
    B3 --> B4[Protonen]
    B3 --> B5[keine Atomkerne]
    B5 --> B6[He, H, Li]
    B6 --> B7[leicht, schwer]
    B7 --> B8[Nachweis]
    B8 --> B9[früher Nebelkammer]
    B9 --> B10[ionisierter Alkohol, Kühlung, Nebel, "Schweiß" d. Teilchen]
    B8 --> B11[heute ICB Cube, Auger-Observatory]
    B11 --> B12[Nachbau Teilchenschauer]
    
    C --> C1[Himmelskörper]
    C1 --> C2[Planeten, Sterne]
    C2 --> C3[ ]
    
    D --> D1[kl. Bestandteile, Wechselwirkungen, 10^-27 m]
    D1 --> D2[Aufbau v. Stoffen]
    D2 --> D3[Anwendung auf Neutronen, Protonen]
    D3 --> D4[4 Bereiche: Gravitation, Schw. u. Licht, Kernkraft, Elektromagnetismus]
    D3 --> D5[up Quark, down Quark, Elektronen]
    D3 --> D6[Antiquarks, kl. Teilchen zerfallen zu 3 Grundpartikeln]
    D3 --> D7[Born, xiv-Boson, Photon]
    
    D4 --> D8[Hilfsmittel: Diagramme]
    D8 --> D9[Auswerten v. Darstellen v. Datenreihen]
    D9 --> D10[Cosmic Web]
    D10 --> D11[Y-X-Diagramm]
    D10 --> D12[Histogramme]
    D11 --> D13[ ]
    D12 --> D13
    
    D13 --> D14[Untersuchung von Eigenschaften von Myonen]
    D14 --> D15[Fit-Funktion Berechnungen]
    D15 --> D16[Hilfsmittel]
    D16 --> D17[Interpretieren]
  
```

The mind map is titled "Astroteilchenphysik" in a central oval. It branches into three main areas: "Kosmologie", "Astronomie", and "Teilchenphysik".

- Kosmologie**
  - Universum, Ursprung, dunkle Materie
  - Hess: Kosmische Strahlung
    - primär
      - Protonen
      - keine Atomkerne
        - He, H, Li
        - leicht, schwer
    - Nachweis
      - früher: Nebelkammer
        - ionisierter Alkohol, Kühlung, Nebel, "Schweiß" d. Teilchen
      - heute: ICB Cube, Auger-Observatory
        - Nachbau Teilchenschauer

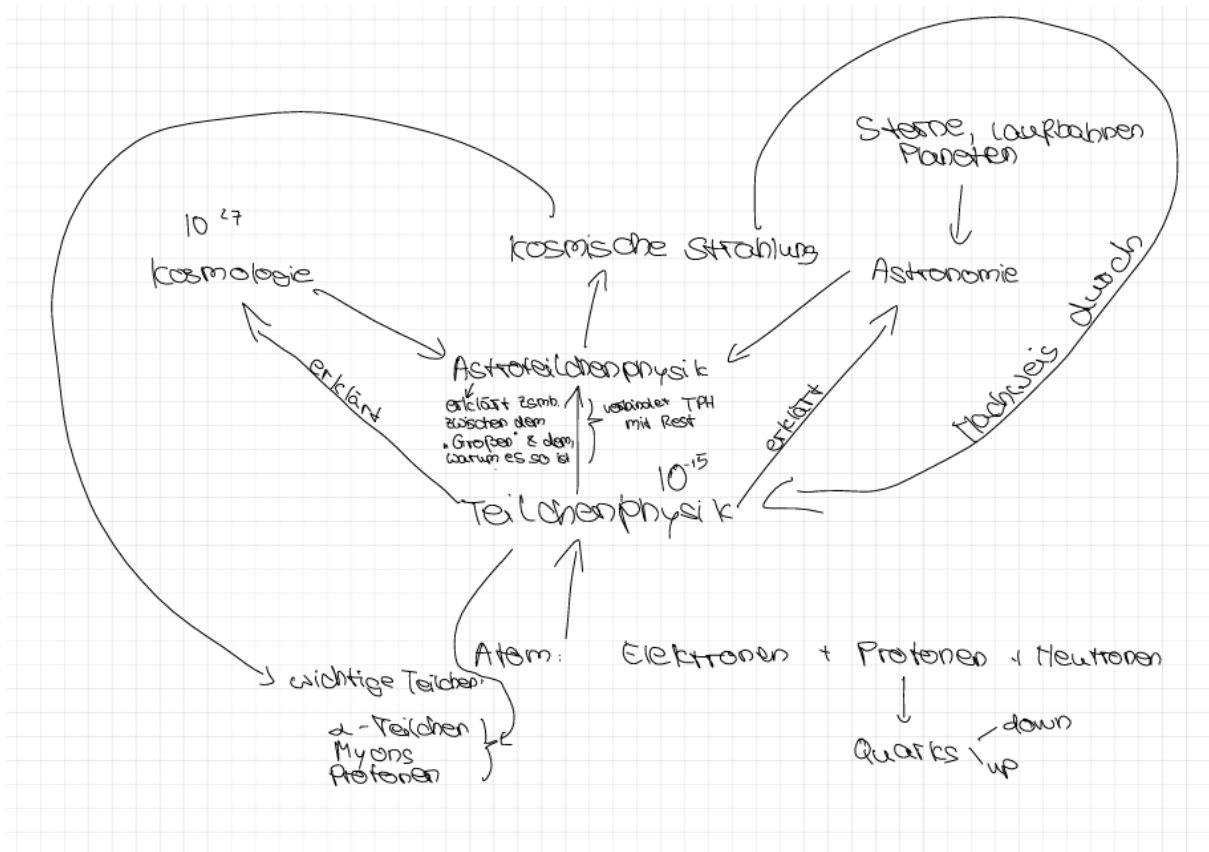
- Astronomie**
- Himmelskörper
  - Planeten, Sterne
  - [ ]
- Teilchenphysik**
- kl. Bestandteile, Wechselwirkungen,  $10^{-27}$  m
- Aufbau v. Stoffen
- Anwendung auf Neutronen, Protonen
  - 4 Bereiche:
    - Gravitation
    - Schw. u. Licht
    - Kernkraft
    - Elektromagnetismus
  - up Quark, down Quark, Elektronen
  - Antiquarks, kl. Teilchen zerfallen zu 3 Grundpartikeln
  - Born, xiv-Boson, Photon
- Hilfsmittel: Diagramme
  - Auswerten v. Darstellen v. Datenreihen
  - Cosmic Web
    - Y-X-Diagramm
    - Histogramme
  - Untersuchung von Eigenschaften von Myonen
    - Fit-Funktion Berechnungen
      - Hilfsmittel
      - Interpretieren

```

graph TD
    AP(ASTROTEILCHENPHYSIK) --> A[Astronomie]
    A --- HK[Himmelskörper]
    AP --> K[Kosmologie]
    K --> U[das Universum]
    U --- AS[als sonnen]
    U --- E[Entstehung]
    K --> PKS[primär kosmologische Strahlung]
    PKS --- T[Test]
    AP --> TP[Teilchenphysik]
    TP --> SK[Schwache Kernkraft]
    SK --> N[Neutrinos]
    TP --> StK[Starke Kernkraft]
    StK --> BM[Baryonische Materie]
    BM --> P[Protonen]
    TP --> WSW[Wann sind wir?]
    WSW --> AM[Alte Materie]
    AM --> AP1[Antiprotonen]
    AP1 --> PN[Proton-Neutron]
    PN --> Q[Quarks]
    Q --- UQ[up & down - Quarks]
    Q --> HB[Higgs Boson]
    Q --> Z[Zerfall]
    Z --- IE[in Elektronen]
    Z --- W[Wasserstoff]
    HB --> IC[IceCube]
    IC --> ND[Nachweis durch Detektoren]
    Z --> IC
    IC --> ND
    IC --> E[Erforschung]
    E --> CR[Cosmic Rays]
    CR --> AP2[Astrophysik]
    CR --> EXP[Experimente]
    AP2 --> MW[Mikro-Wellen]
    MW --> AR[Antenneforschung]
    MW --> RT[Relativitätstheorie?]
  
```



Schüler\*in 7:





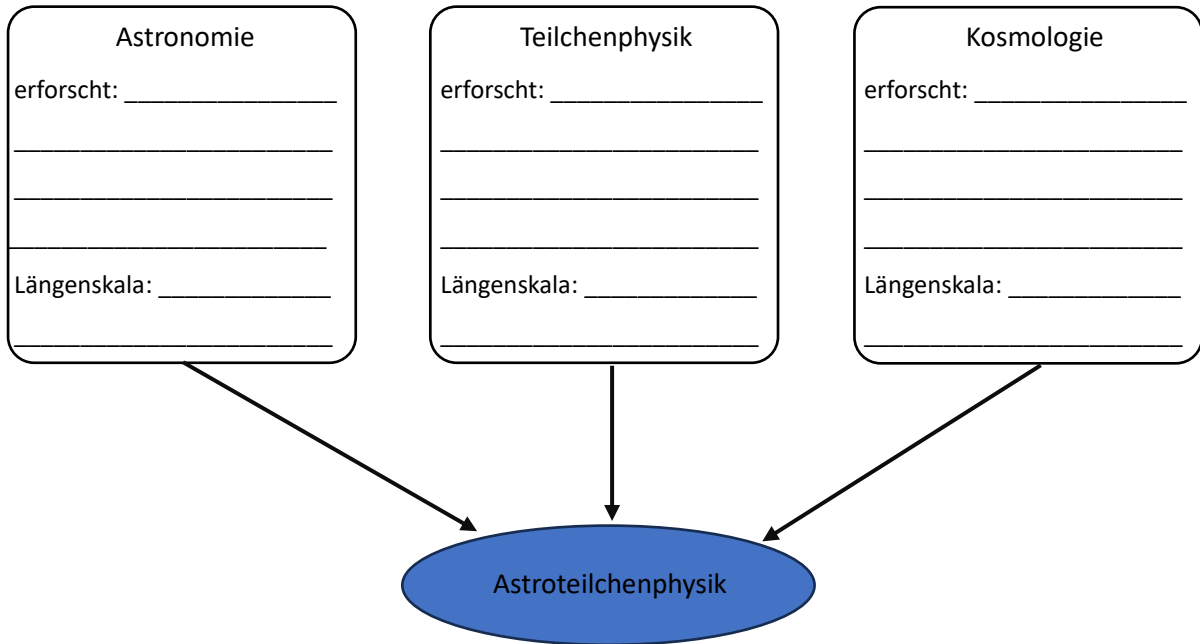
## **Materialien für das Unterrichtskonzept zur Astroteilchenphysik**

### **A.8 überarbeitete Version der Arbeitsblätter**

# Astroteilchenphysik

## Arbeitsblatt 1: Grundlagen

**Aufgabe 1:** Ergänze die folgende Übersicht.



Forschungsgegenstand: \_\_\_\_\_

**Aufgabe 2:** Entscheide, ob die folgenden Aussagen zum Standardmodell der Elementarteilchen wahr oder falsch sind. Kreuze das entsprechende Feld an.

- |    |  | richtig               | falsch                |
|----|--|-----------------------|-----------------------|
| 1. | Materie besteht aus drei Sorten von Elementarteilchen: Up-Quarks, Down-Quarks und Elektronen.                          | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 2. | Zu jeder fundamentalen Wechselwirkung existiert ein sogenanntes Botenteilchen. Diese wurden bereits alle nachgewiesen. | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 3. | Das Photon ist das Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung.   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 4. | Ein Proton besteht aus einem up-Quark und einem down-Quark.  | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 5. | Bei dem Myon handelt es sich um ein „schwereres Elektron“.   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

### Aufgabe 3:

Ordne die Beispiele jeweils einer der vier fundamentalen Wechselwirkungen zu, indem du sie miteinander verbindest.

starke Wechselwirkung

schwache Wechselwirkung

elektromagnetische Wechselwirkung

## Gravitation

## Wasserstoffbombe

## Planetenbewegung

## Zusammenhalt der Atomkerne

Muskelkraft

Schwerkraft

## Chemische Reaktionen

Begründe deine Wahl der Zuordnungen stichpunktartig.

A full-page sheet of white graph paper featuring a uniform grid of thin, light gray horizontal and vertical lines. The grid consists of small squares covering the entire area of the page.

# Astroteilchenphysik

## Arbeitsblatt 2: Kosmische Strahlung

## Wiederholung:

Klicke auf den folgenden Link bzw. scanne den QR-Code.

Löse die auf Learning Snacks bereit gestellten Aufgaben.

<https://www.learningsnacks.de/share/409226/45354df3214eec90b5a357542653872890aa9ef7>

**Aufgabe 1:** Ergänze den folgenden Lückentext.

Bei der kosmischen Strahlung, die im 20. Jahrhundert von \_\_\_\_\_ entdeckt wurde, handelt es sich um eine aus elektrisch geladenen Teilchen bestehende Strahlungsart. Dabei wird zwischen primärer und \_\_\_\_\_ Strahlung unterschieden. Die hochenergetische primäre Strahlung besteht dabei zu 98% aus \_\_\_\_\_, dazu zählen \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, aber auch \_\_\_\_\_. Wenn diese aus dem Weltall stammenden Teilchen auf die Erdatmosphäre treffen, wechselwirkt die kosmische Strahlung mit den Luft-Molekülen und es entstehen \_\_\_\_\_ Teilchen, wie zum Beispiel \_\_\_\_\_. Diese können auf der Erde mit verschiedenen Messinstrumenten nachgewiesen werden. In den 1930er Jahren verwendete man für den Nachweis dieser Teilchen eine \_\_\_\_\_. Die elektrisch geladenen kosmischen Teilchen ionisierten Alkohol-Moleküle und ein Nebelstreifen zeigte die Teilchenspur an. In der heutigen Zeit nutzt man für den Nachweis \_\_\_\_\_. Über den \_\_\_\_\_-Effekt und Photomultiplier können viele Eigenschaften der Teilchen bestimmt werden, wie zum Beispiel deren Energie oder möglicher Herkunftsort.

**Aufgabe 2:** Erkläre die Funktionsweise eines möglichen Nachweisinstruments für kosmische Strahlung. Nenne ein Experiment, bei dem dieses Instrument zum Einsatz kommt.

[illegible]

# Astroteilchenphysik

## Arbeitsblatt 3: Arbeiten mit Diagrammen

# Astroteilchenphysik

## Arbeitsblatt 3: Arbeiten mit Diagrammen

### Aufgabe 1:

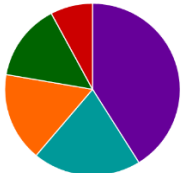
Lies dir den beiliegenden Text durch.

Erläutere die Rolle von Diagrammen in der Wissenschaft.

[illegible]

### Aufgabe 2:

Ergänze die folgende Diagrammübersicht.

Name	xy-Diagramm	1D-Histogramm	
Aufbau / Eigenschaften			
Besonderheiten			
Abbildung			
Anwendungs- bereiche			

### Aufgabe 3:

Ein wichtiger Bestandteil der Physik ist das Interpretieren von Diagrammen.

Welche Schritte sind dabei zu beachten?

A large grid of graph paper with 20 columns and 10 rows. The grid is composed of small squares, with a slightly larger square at the top left corner, likely for a title or header. The grid is empty and ready for use.

# Astroteilchenphysik

## Protokoll: Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen

# Astroteilchenphysik

## Protokoll: Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen

**Aufgabenstellung:**

**Aufgabenstellung:** Untersuche mit dem Experiment „CosMO-Mühle“ die Ankunftsrichtung von Myonen.

### Theoretische Vorüberlegungen:

**Theoretische Vorüberlegungen:** Beantworte die folgenden Aufgaben.

**Aufgabe 1**      Erstelle einen Steckbrief zum Myon. *Folgende Punkte sollten dabei beachtet werden:*  
*elektrische Ladung, Masse im Vergleich zum Elektron, Aussehen der Spur in der Nebelkammer und an welchen Wechselwirkungen nimmt es teil?*

[illegible]

## Aufgabe 2

Benenne den Entdecker der kosmischen Strahlung. Erläutere die Nachweismethode von elektrisch geladener Teilchenstrahlung im 20. Jahrhundert stichpunktartig.

[illegible]

### Aufgabe 3

Eine der größten Forschungsanlagen der Welt, das Auger-Observatorium, benutzt Wassertanks als Flüssigszintillator für die Untersuchung kosmischer Strahlung. Die Funktionsweise der Szintillatoren kann über den Tscherenkow-Effekt beschrieben werden. Erkläre stichpunktartig diesen Effekt.

[illegible]







# Astroteilchenphysik

## Protokoll: Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen

# Astroteilchenphysik

## Protokoll: Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen

**Aufgabenstellung:**

**Aufgabenstellung:** Bestimme mit dem Experiment „LiDO“ die mittlere Lebensdauer eines Myons.

**Theoretische Vorüberlegungen:** Löse die folgenden Aufgaben

### Aufgabe 1: Myonen-Zerfall (Feynman-Diagramm)

Feynman-Diagramme sind eine Möglichkeit, um die Umwandlung von Elementarteilchen möglichst anschaulich darzustellen. Für das „richtige“ Lesen eines solchen Diagramms muss der linksstehende Pfeil beachtet werden, der den zeitlichen Verlauf angibt. Die Pfeile innerhalb des Diagramms dienen nur zur Kennzeichnung der einzelnen Elementarteilchen und sind in diesem Fall nicht weiter von belangen.

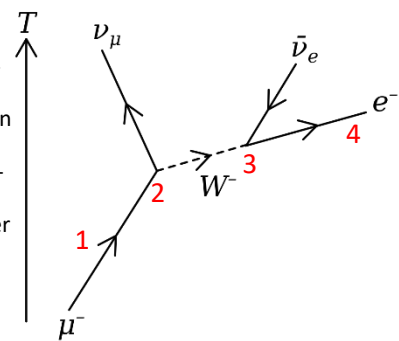


Abb. 1: Feynman-Diagramm

In Abb. 1 ist der Zerfall eines Myons dargestellt, wie er auch in diesem Experiment (im Szintillator) stattfindet. Ordne die in Abb. 1 eingefügten Zahlen (rot) den richtigen Aussagen zu, indem du die Zahlen in die entsprechenden Kreise schreibst.

- ☐ Das Myon wandelt sich in ein  $W^-$ -Boson und ein Myon-Neutrino um.

- Das Myon dringt in den Flüssigszintillator ein und erzeugt einen ersten Lichtblitz. .

- ☐ Das  $W^-$ -Boson wandelt sich nach kurzer Zeit in ein Elektron und ein Anti-Elektronneutrino um.

- ☐ Das Teilchen erzeugt einen zweiten Lichtblitz.

Definiere den Begriff „mittlere Lebensdauer“.

[illegible]

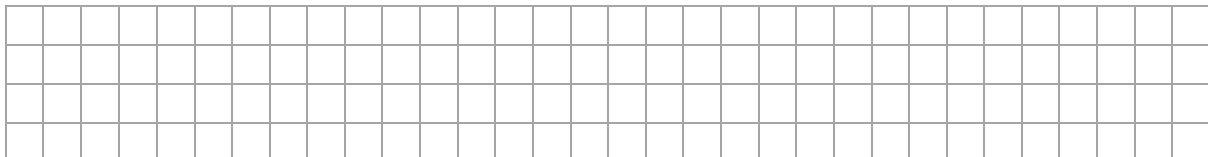
## Aufgabe 2: Fit-Funktion

Für das Ableiten von Gesetzmäßigkeiten aus physikalischen Experimentierdaten wird oftmals eine Fit-Funktion bzw. eine Regressionsfunktion verwendet. Dabei handelt es sich um einen Funktionsgraph, der möglichst gut mit den aufgenommenen Messwerten übereinstimmt. Diese Vorgehensweise sollst du nun einmal selbst durchführen. Dafür steht die folgende Messwerttabelle zur Verfügung.

x	1,5	2,4	3,5	4,6	5,7	6,5	7,3
y	0	8,5	15,1	17,2	14,9	10,5	3,8

Nutze deinen Taschenrechner, um die Messpunkte zunächst graphisch darzustellen. Ermittle anschließend unter Nutzung deines Taschenrechners eine Funktionsgleichung für die Fit-Funktion. Gib diese an. Beschreibe dein Vorgehen beim Ermitteln der Funktionsgleichung stichpunktartig.

*Hinweis: Beschreibe den Verlauf der Messpunkte. Welcher Funktionstyp kommt für die Fit-Funktion in Frage?*



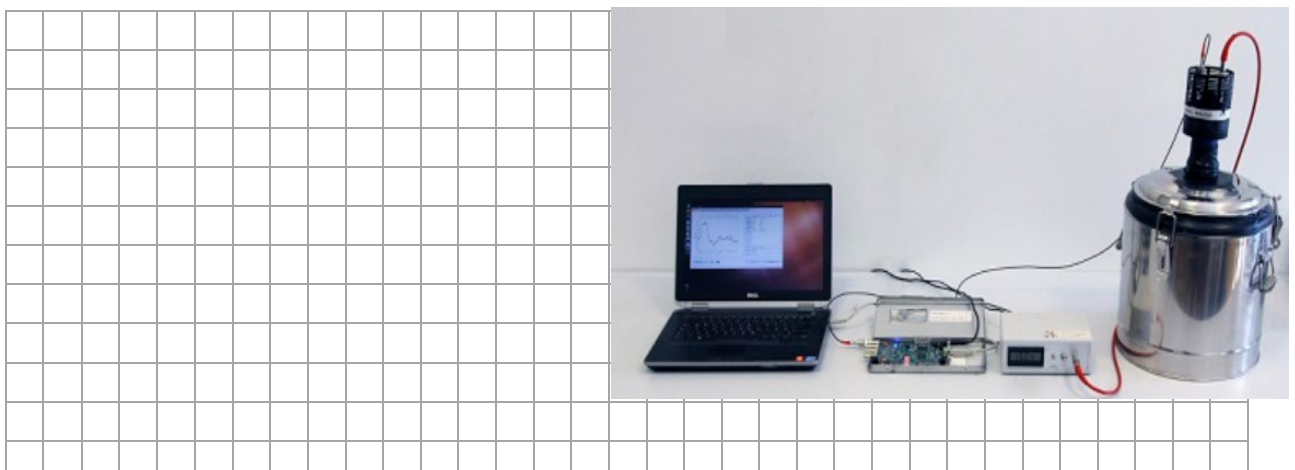
## Hilfestellung: Exponentialfunktion

Zerfallsprozesse werden in der Physik durch Exponentialfunktionen der Form  $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  beschrieben. Du kannst den unten aufgeführten Link aufrufen, um den Einfluss der einzelnen Parameter auf den Graphen zu erklären.

<https://www.geogebra.org/m/JyxgvZU7#:~:text=Eine%20Exponentialfunktion%20ist%20abh%C3%A4ngig%20von,anderem%20%C3%BCber%20Wachstum%20oder%20Zerfall.>

## Versuchsaufbau:

Beschreibe den Versuchsaufbau. Nutze dafür die zur Verfügung stehenden Informationen auf der Cosmic@Web-Seite. Benenne die Materialien, welche für dieses Experiment benötigt werden.



## Datenauswertung

**Durchführungsbeschreibung:**

Der Zerfall von Elementarteilchen ist ein statistischer Prozess, welcher über ein Zerfallsgesetz der Form  $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  beschrieben werden kann.  $\lambda$  ist dabei die Zerfallskonstante. Die mittlere Lebensdauer eines Myons  $\tau$  kann über die folgende Formel berechnet werden:  $\tau = \frac{1}{\lambda}$

Nun soll die mittlere Lebensdauer eines Myons bestimmt werden. Dafür nutzt man die Zeitdifferenz zwischen den Lichtblitzen, die mit  $\Delta t$  (delta\_t) bezeichnet wird. Ziel ist es zu bestimmen, wie oft eine bestimmte Zeitdifferenz gemessen wurde und dies mit einem **geeigneten Diagrammtyp** zu veranschaulichen.

### Aufgabe 4

Erstelle mit Hilfe von Cosmic@Web ein geeignetes Diagramm , in dem die Häufigkeiten der gemessenen Zeitdifferenzen dargestellt sind. Verwende dafür den Datensatz „2021\_L – muon life time“. Begründe kurz die Wahl des Diagrammtyps. Speichere das Diagramm als PDF-Dokument ab und wähle einen passenden Diagrammtitel.

[illegible]

### Aufgabe 5

Interpretiere das von dir erstellte Diagramm.

[illegible]

### Aufgabe 6

Wähle mindestens vier geeignete Messpunkte aus. Trage deren Koordinaten in die folgende Messwerttabelle ein.

$\Delta t$ in $\mu s$							
Häufigkeit							

Gib eine Funktionsgleichung für eine passende Fitfunktion an. Ermittle über die Zerfallskonstante  $\lambda$  nun die mittlere Lebensdauer mit  $\tau = \frac{1}{\lambda}$ .

[illegible]

## Aufgabe 7

Aus dem Experiment „CosMO-Mühle“ kann man die Geschwindigkeit eines Myons ermitteln, indem man die Zeit zwischen den beiden Lichtblitzen misst, die entstehen, wenn das Myon die zwei Detektorplatten mit konstanter Geschwindigkeit durchquert. Die beiden Detektorplatten haben einen Abstand von 2,8 m und die Zeitdifferenz zwischen den Lichtblitzen liegt bei 9,40 ns. Berechne die Geschwindigkeit des Myons. Vergleiche die berechnete Geschwindigkeit mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

[illegible]

Mit der ermittelten Geschwindigkeit und die durch dieses Experiment ermittelte mittlere Lebensdauer kann nun die durchschnittliche Flugstrecke eines Myons ermittelt werden. Berechne diese Strecke. Was fällt auf?

A large grid of graph paper with 20 columns and 10 rows. The grid is composed of small squares, with a slightly larger square at the top left corner, likely for a title or header. The grid is empty and ready for use.

### Erklärungsansatz:

Finde einen möglichen Erklärungsansatz für diesen Widerspruch. Myonen entstehen in einer Höhe von 10 km. Wie kann es sein, dass wir Myonen auf der Erde messen/nachweisen können, die eigentlich nach einer durchschnittlichen Strecke von wenigen hundert Metern zerfallen?

[illegible]

## A.9 überarbeitete Version der Power-Point-Präsentation

### 1. Doppelstunde: Einführung in die Astroteilchenphysik

1

Warum müssen Piloten\*innen auf Flügen stets ein Dosimeter mit sich führen?

Recherchiere mit deinem Smartphone / Tablet und beantworte die Frage. Gehe dabei auf den physikalischen Hintergrund ein.  
Tausche dich mit deinem\*r Banknachbarn\*in über die Ergebnisse der Recherche aus.  
Nach fünf Minuten werden die Ergebnisse im Plenum zusammengetragen.

2

### Das Universum verstehen – Astroteilchenphysik

Lukas Schröter



Abb. P2

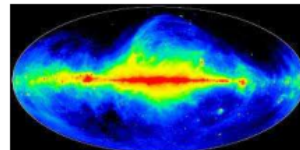


Abb. P1

3

### Was ist Astroteilchenphysik?

Wie und Wann entstand das  
Universum?

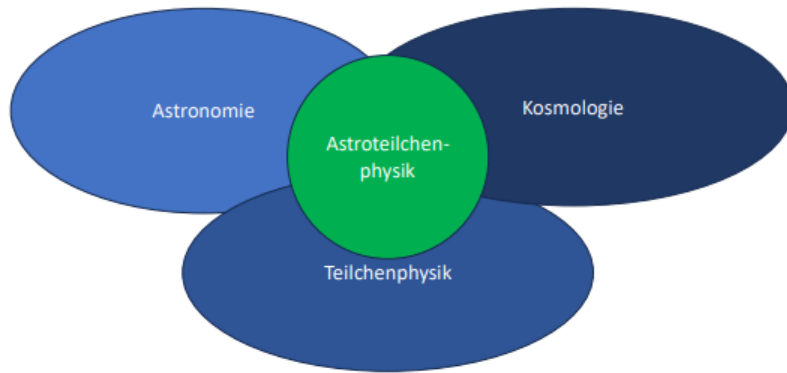
Welche fundamentalen Kräfte  
gibt es?

Welche fundamentalen Bausteine  
gibt es?

Was ist dunkle Materie?

4

## Was ist Astroteilchenphysik?



5

## Arbeitsauftrag

- Bearbeitet die Aufgabe 1 des Arbeitsblattes: „Grundlagen der Astroteilchenphysik“ in Partnerarbeit.
- Für die Recherche dürft ihr euren Physikhefter, aber auch euer Smartphone / das Internet nutzen.

6

## Vergleich der Ergebnisse: Astronomie

- Beobachtung und Untersuchung von Himmelskörpern (z.B. Planeten, Sterne oder Galaxien)
- Längenskala: AE (Astronomische Einheit), Parsec, Lichtjahr
- Wichtige Erkenntnisse:
  - heliozentrisches Weltbild
  - Planetenbahnen um die Sonne
  - Lebensstadien eines Sterns
  - Verhalten von Galaxien

7

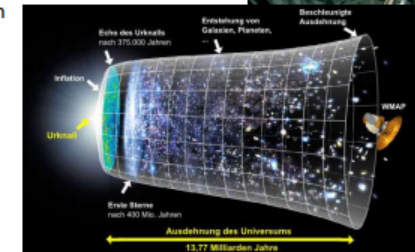
## Kosmologie

- Wissenschaft des gesamten Universums
- Beschäftigt sich mit:
  - Ursprung, Entwicklung des Universums
  - grundlegende Strukturen
  - Dunkler Materie

Abb. P4



Abb. P3



8

## Dunkle Materie



Abb. P5

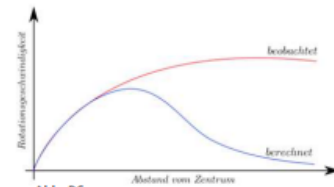


Abb. P6

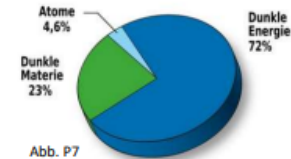


Abb. P7

9

## Teilchenphysik

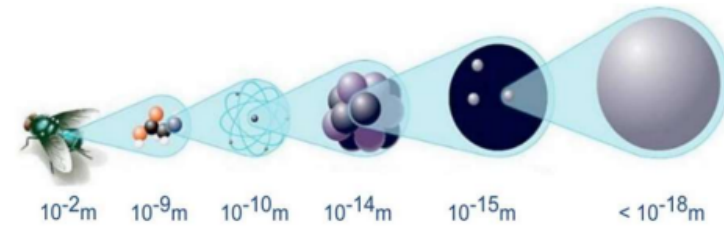


Abb. P8

- Was sind die fundamentalen Bausteine der Materie?
- Welche fundamentalen Kräfte / Wechselwirkungen existieren?

10

## Standardmodell der Elementarteilchen

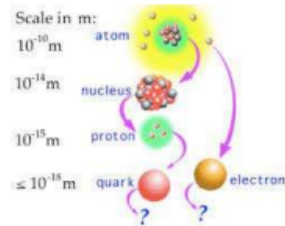


Abb. P9

### STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES

QUARKS	UP mass 2,3 MeV/c <sup>2</sup> charge 2/3 spin 1/2	CHARM 1,275 GeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2	TOP 173,107 GeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2	GLUON 0 1 1	HIGGS BOSON 125 GeV/c <sup>2</sup> 0 0
	DOWN 4,8 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2	STRANGE 95 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2	BOTTOM 4,18 GeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2	PHOTON 0 0 1	
	ELECTRON 0,511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2	MUON 105,7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2	TAU 1,777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2	Z BOSON 91,2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1	
LEPTONS	ELECTRON NEUTRINO ~0,2 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2	MUON NEUTRINO ~0,17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2	TAU NEUTRINO ~1,78 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2	W BOSON 80,4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1	

Abb. P10

11

## Fundamentale Wechselwirkungen



Abb. P11



Abb. P12

Gravitation

Elektromagnetismus



Abb. P13



Abb. P14

starke  
Kernkraft

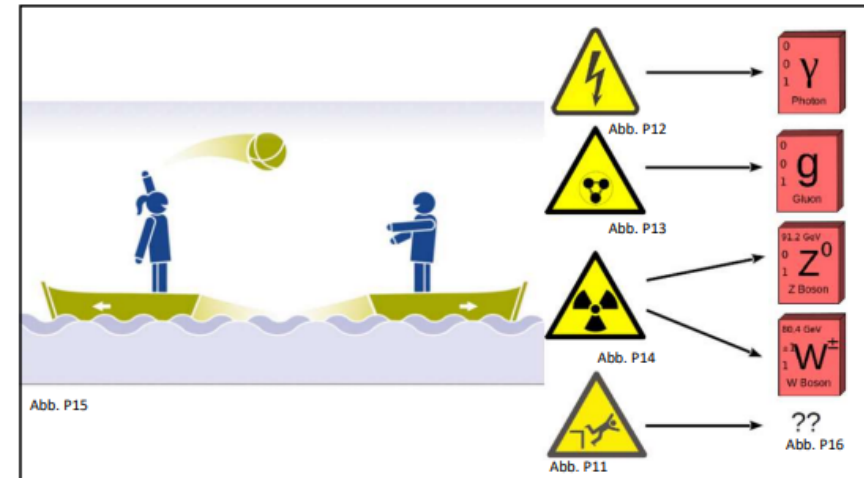
schwache  
Kernkraft

12

## Gruppenarbeit

- Teilt euch in insgesamt 4 Gruppen auf.
- Jede Gruppe recherchiert zu einer fundamentalen Wechselwirkung und erarbeitet die folgenden Punkte:
  - Austauschteilchen / Botenteilchen
  - Ladung
  - Zwei Beispiele, die über die Wechselwirkung beschrieben und erklärt werden können
  - Der Vergleich erfolgt nach fünf Minuten.

13



14

[illegible]

Abb. P16

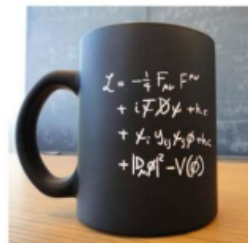


Abb. P17

[illegible]

Abb. P18

15

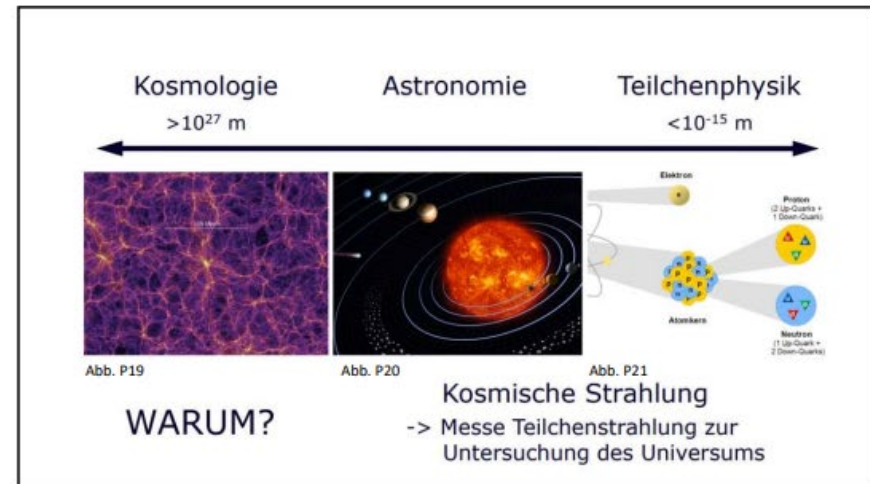
16



## Übung – Grundlagen der Astroteilchenphysik

Löse die Aufgaben 2 und 3 auf dem Arbeitsblatt 1 in Einzelarbeit.

17



18

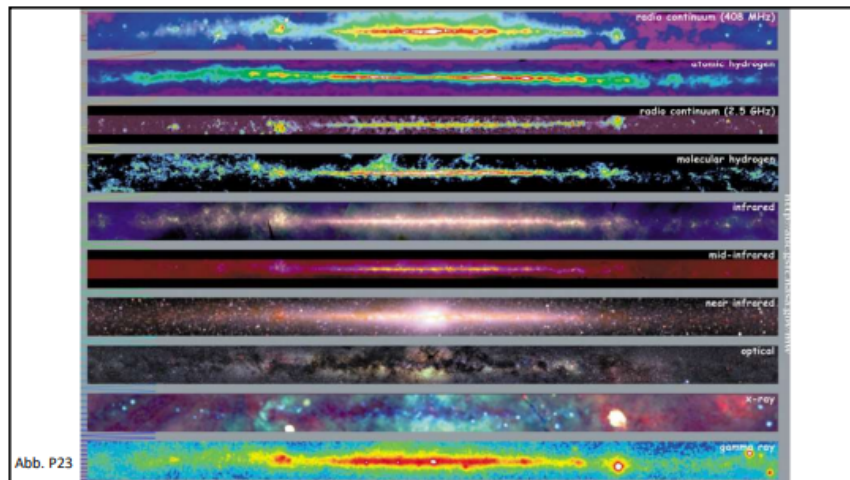
## Astroteilchenphysik

- nutzt Teilchenphysik, um das Weltall zu erforschen
- Phänomene auf sehr großen Längenskalen sollen mit sehr kleinen Objekten beschrieben werden
- Forschungsgegenstand: Kosmische Strahlung

19



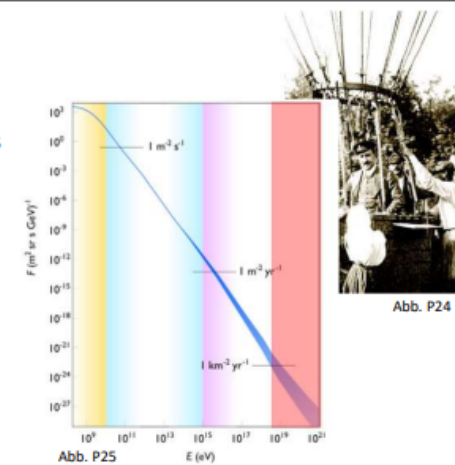
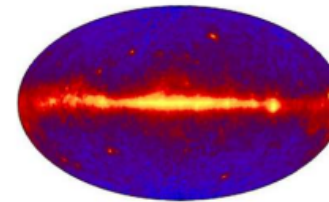
20



21

## Entdeckung

- 1911 durch Viktor Franz Hess
- Ballonfahrt in 5000 m Höhe



22

## Übung: story-telling

- Lies dir den story-telling Text aus der Sicht von Victor Hess durch.
- Löse mit Hilfe des Textes Aufgabe 1 des Arbeitsblattes „Kosmische Strahlung“

23

- Fasse die Lerninhalte der Stunde mündlich zusammen. Tausche dich mit deinem\*r Banknachbarn\*in über eventuelle Unklarheiten aus und versucht diese gemeinsam zu klären.

- HA: Recherchiere zu moderne Nachweismethoden und – instrumenten für die kosmische Strahlung und Myonen. Löse anschließend Aufgabe 2 des Arbeitsblattes „Kosmische Strahlung“.

24

## 2. Doppelstunde: Einführung von Cosmic@Web

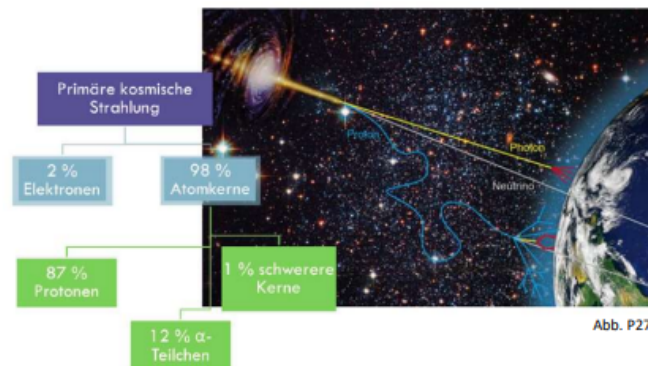
25

Scanne den folgenden QR-Code.



26

### Bestandteile



27

Was passiert wenn kosmische Teilchen auf die Erde treffen?



28



## Teilchenschauer

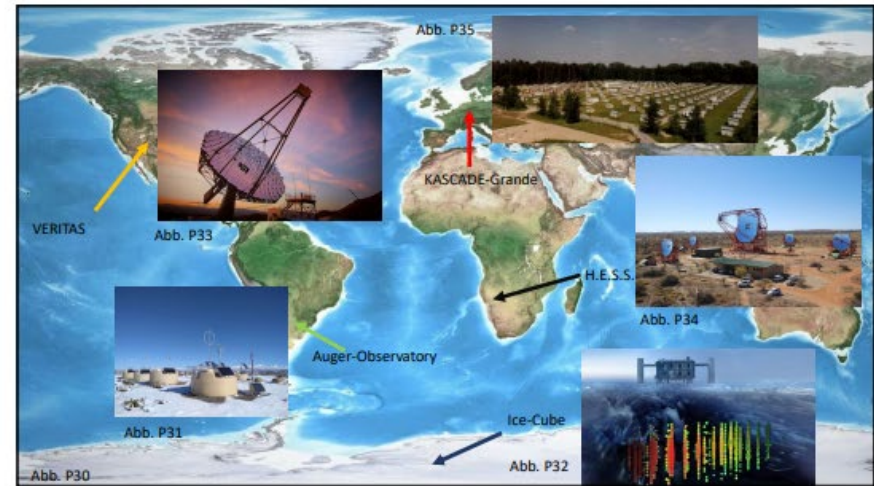


Abb. P28



Abb. P29

29



30

## Nebelkammer

- Nachweisinstrument für elektrisch geladene Teilchen
- entwickelt in den 1920ern

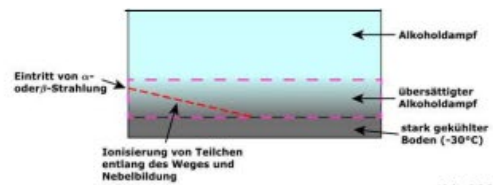


Abb. P36

31

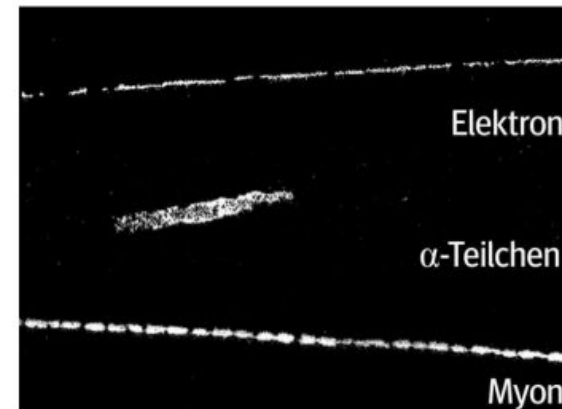


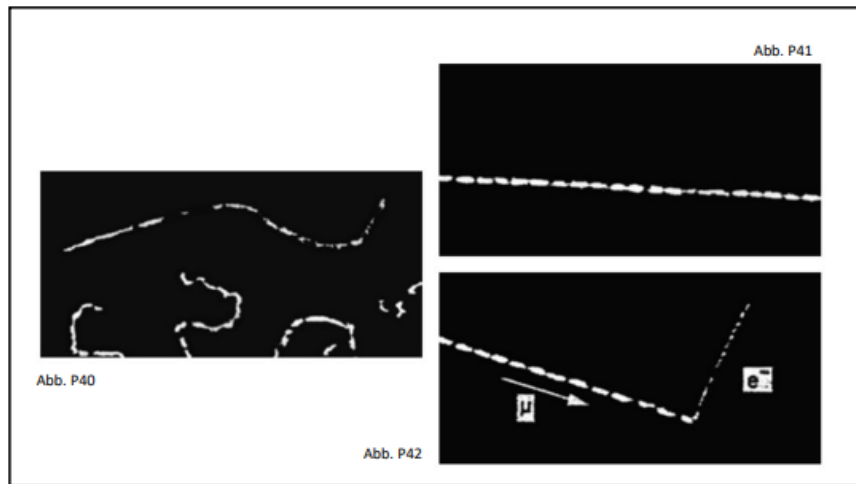
Abb. P37

Abb. P38

Abb. P39

32





33

### Wie wird kosmische Strahlung detektiert?

- Immer gleiches Prinzip: Tscherenkow-Effekt

kleiner als  
Lichtgeschwindigkeit

Abb. P43

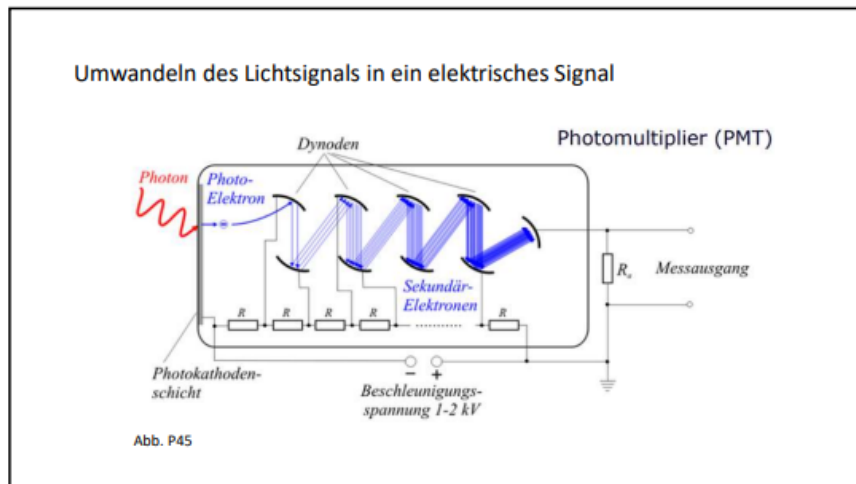
größer als  
Lichtgeschwindigkeit

Abb. P44

Wasser, Luft, Eis

Abb. P44

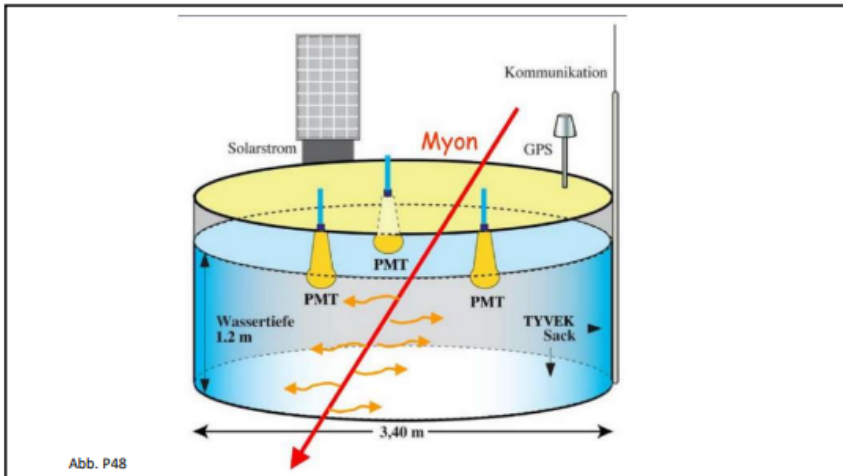
34



35



36



37

## Arbeiten mit Cosmic@Web

- Scanne den folgenden QR-Code



38



39

## Cosmic@Web

### Aufgaben zum Einstieg:

1. Lies dir den Informationstext zu Cosmic@Web durch.
2. Beginne das Tutorial. Mache dir dabei Notizen zum Ablauf der Diagrammerstellung.

40

## Arbeitsauftrag

- Teilt euch in vier Gruppen eingeteilt, jeweils zwei Gruppen bearbeiten dasselbe Protokoll.
- Gruppe A1, A2: Protokoll zur Bestimmung der Ankunftsrichtung von Myonen
- Gruppe B1, B2: Protokoll zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer.
- Bearbeitet die Protokollaufgaben in Gruppenarbeit.
- Als Hilfsmittel stehen euch das Internet, das Arbeitsblatt zum „Arbeiten mit Diagrammen“ die Experimente-Datenbank und der Diagrammerstellungsmodus von Cosmic@Web zur Verfügung.

41

## Arbeitsauftrag

- Am Ende der nächsten Doppelstunde werden die Ergebnisse der Protokollaufgaben in Form eines Vortrags präsentiert.
- Jeweils eine Gruppe erörtert die theoretischen Vorüberlegungen und den Versuchsaufbau des jeweiligen Experiments. (5 Minuten)
- Die andere Gruppe erklärt die erstellten Diagramme und wertet diese aus. (5 Minuten)
- Den Abschluss bildet eine Diskussion, in der Fragen gestellt und Feedback gegeben werden darf. Die Fragen richten sich dabei an beide Gruppen, die das Protokoll bearbeiteten. (5 Minuten)

42

## 3. Doppelstunde: Arbeiten mit Cosmic@Web

43

## Diagrammtypen

### xy-Diagramm

- Verwendung
  - Veranschaulichung der Abhängigkeit/Beziehung zweier Variablen
  - Identifizierung von Mustern, Trends und Korrelationen zwischen Messdaten
- Achsen
  - x-Achse: unabhängige Variable (physikalische Größe)
  - y-Achse: abhängige Variable (physikalische Größe)
- Anwendung
  - in Physik: Analyse von Experimentierdaten
  - Entwicklung einer Größe in Abh. Von der Zeit
  - Finanzdaten etc.

44



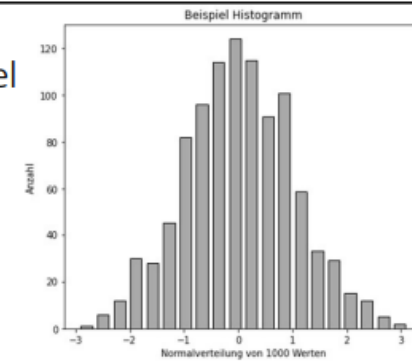
## Diagrammtypen

### 1D-Histogramm

- Verwendung
  - Analyse der Datenverteilung innerhalb eines Messintervalls
  - Darstellung der abs. Häufigkeit von Datenpunkten in verschiedenen Klassen/Intervallen
- Achsen
  - x-Achse: Klassen/Intervalle der Variable
  - y-Achse: abs. Häufigkeit der Merkmalsausprägung
- Anwendung
  - häufig in Statistik
  - Marktforschung und Qualitätskontrolle

45

## Histogramm - Beispiel



Nenne zwei andere Diagrammtypen.

Abb. P49

Erkläre deren Aufbau und Besonderheiten.

46

## Vorgehensweise beim Auswerten von Diagrammen

### Musterlösung

Schritt 1: Diagramm einordnen  
(Typ, Kontext, Titel, Achsenbeschriftungen, Formelzeichen, Einheit)

Schritt 2: Messwerte beschreiben  
(Trends, Verlauf des Graphen, markante / besondere Punkte, Proportionalität)

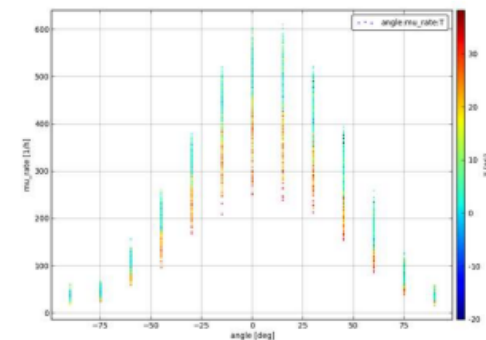
Schritt 3: Einordnen in physikalisches Hintergrundwissen  
(Erklärung der Messwerte durch ein physikalisches Modell)

Schritt 4: ggf. Vergleich mit anderen Diagrammen + neue Fragen stellen

47

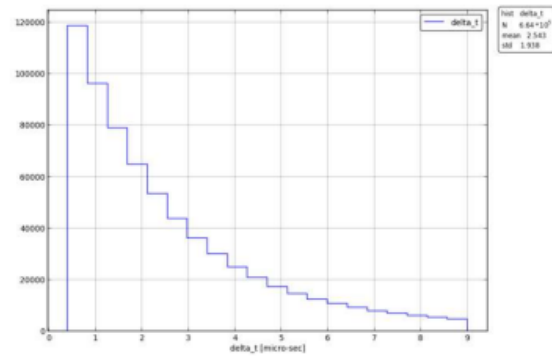
## Datenauswertung mit Cosmic@Web

### Musterlösung – CosMO-Mühle



48

### Musterlösung – LiDO-Experiment



49

### Wieso können wir Myonen auf der Erde messen?

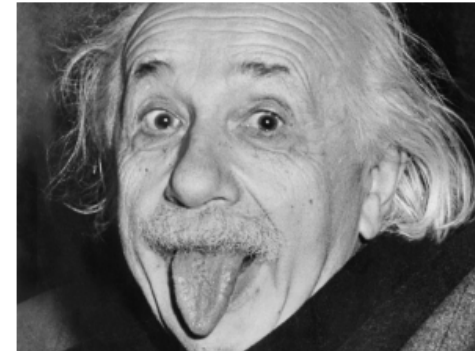


Abb. P51

50

## **A.10 weitere Arbeitsmaterialien**

### **1. Doppelstunde: story-telling-Text**

#### **Die Reise ins Unbekannte: Mein Weg zur Entdeckung der Kosmischen Strahlung**

Guten Tag. Mein Name ist Franz Viktor Hess und ich möchte dir von einer Entdeckung erzählen, die die Grenzen unserer physikalischen Welt erweiterte. Wir schrieben das Jahr 1911 und ich war ein junger Physiker, der von der Möglichkeit fasziniert war, die Geheimnisse des Universums zu entschlüsseln. In dieser Zeit beschäftigten sich alle möglichen Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, wie Röntgen oder Marie Curie, mit der Radioaktivität. Auch ich selbst war fasziniert von diesem Bereich der Physik, besonders von der natürlichen Radioaktivität, also der radioaktiven Strahlung, die durch natürliche radioaktive Quellen erzeugt wird.

Um also das Vorhandensein natürlicher radioaktiver Strahlung nachzuweisen, plante ich ein Experiment. Oben, in der klaren, unberührten Luft, begann ich meine Experimente. Ich plante mit einem Ballon in mehrere Kilometer Höhe aufzusteigen. Da auf dieser Höhe keine natürlichen radioaktiven Quellen mehr vorhanden wären, sollten meine Messgeräte keinerlei Strahlenbelastung verzeichnen. Im Umkehrschluss würde das bedeuten, dass es nur auf Höhe des Erdbodens radioaktive Strahlung gibt, die von den dortigen Quellen erzeugt würde. Was ich dort oben in diesen luftigen Höhen jedoch maß, entsprach überhaupt nicht meiner Erwartungshaltung.

Als ich meine Apparaturen justierte, geschah etwas Unerwartetes. Die Anzeige meines Geigerzählers begann in einer Höhe von 5000 Metern zu steigen anstatt zu sinken. Die Strahlungsbelastung in dieser Höhe nahm also wieder zu. Aber wie wäre das möglich. Die radioaktiven Strahlungsquellen sollten alle mehrere Kilometer entfernt am Erdboden sein. Ich konnte es kaum glauben, aber ich spürte, dass ich auf etwas Großes gestoßen war.

In den folgenden Wochen und Monaten arbeitete ich unermüdlich daran, diese mysteriöse Strahlung zu verstehen. Ich entdeckte, dass sie aus elektrisch geladenen Teilchen bestand und da die Strahlungsbelastung mit steigender Höhe immer weiter anwuchs, schlussfolgerte ich, dass diese Art der Strahlung aus dem Weltall kam und so gab ich dieser Strahlung ihren Namen: die kosmische Strahlung. Die Teilchen, die aus dem Weltall auf die Erde trafen, nannte ich kosmische Teilchen. Es war, als ob das Universum selbst mit uns kommunizieren wollte, und ich war entschlossen, seine Botschaft zu entschlüsseln.

Aber die Entdeckung der kosmischen Strahlung war nur der Anfang. Ich musste auch herausfinden, wie man diese Teilchen nachweisen konnte, um Eigenschaften zu bestimmen. Mit innovativen Nachweisinstrumenten, wie der Nebelkammer, wurden bald Möglichkeiten entwickelt, mit denen man elektrisch geladene Teilchen, wie zum Beispiel Elektronen, Protonen oder Myonen nachweisen konnte. Mit dem Entdecken vieler elementarer Teilchen, aus denen das Universum aufgebaut ist, begann man auch auf die Zusammensetzung der kosmischen Teilchenstrahlung zu schließen. Man stellt fest, dass es zwei Arten kosmischer Teilchen gab: die primären Teilchen, welche sich durch das Weltall bewegen, und die

sekundären Teilchen, die mit geeigneten Instrumenten sogar auf der Erdoberfläche detektiert werden können.

Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen fanden heraus, dass die primäre Strahlung hauptsächlich aus Atomkernen besteht, also aus Protonen (dem Atomkern des Wasserstoff-Atoms), aus Alphateilchen (dem Kern eines Helium-Atoms) und schweren Kernen. Physiker\*innen, wie Richard Feynman, beschrieben, dass diese primären Teilchen, wenn sie auf die Erdatmosphäre und die dortigen Luftmoleküle treffen, viel von ihrer Energie abgeben und in sogenannte sekundäre Teilchen zerfallen. Dieser Prozess wiederholt sich unfassbar oft, sodass regelrechte Teilchenschauer entstehen, die eine Fläche von mehreren Quadratkilometern bedecken. Den Hauptbestandteil dieser sekundären Strahlung bilden vor allem Myonen, die sich unfassbar schnell fortbewegen.

Heute, viele Jahre später, ist die Entdeckung der kosmischen Strahlung zu einem grundlegenden Teil unseres Verständnisses des Universums geworden. Im späteren 20. und 21. Jahrhundert wurden weitere moderne Nachweisinstrumente für diese Strahlung erfunden, wie Szintillatoren, also Stoffe, die leuchten, wenn elektrisch geladene Teilchen durch sie hindurchfliegen, oder die Tscherenkow-Strahlung, die als blaues Leuchten beobachtbar ist, wenn Myonen durch Eis oder Wasser fliegen. Die kosmische Strahlung hat neue Einsichten in die Physik ermöglicht und die Tür zu einer Welt voller Geheimnisse und Möglichkeiten geöffnet.

Die Entdeckung der kosmischen Strahlung wird für immer ein Teil meiner Geschichte sein. Es war eine Reise ins Unbekannte, die mein Leben für immer verändert hat und die mich gelehrt hat, dass die größten Abenteuer im Universum oft dort zu finden sind, wo wir es am wenigsten erwarten. Meine Reise mag vorbei sein, aber du, der du gerade diesen Text liest, hast noch reichlich Gelegenheit dazu dieses Geheimnis des Universums und der Astroteilchenphysik weiter zu erforschen. Ich wünsche Dir dabei viel Glück.

## 2. Doppelstunde

### Wiederholung: Learning Snacks

URL:

<https://www.learningsnacks.de/#/welcome?userid=117622&channel=Learning%20Snacks>

Dieser Learning Snack dient der Wiederholung des Wissens aus der letzten Unterrichtsstunde.  
Beantworte die folgenden Aufgaben

Welche Wissenschaften bilden die fachliche Grundlage für die Astroteilchenphysik?

- ☐ A Optik
- ☒ B Teilchenphysik
- ☒ C Kosmologie
- ☒ D Astronomie
- ☐ E Festkörperphysik

Mehrfachauswahl prüfen



Aus welchen Elementarteilchen besteht die stabile Materie im Universum?

- ☒ A Elektronen
- ☒ B up-Quarks
- ☐ C top-Quarks
- ☒ D Down-Quarks
- ☐ E Myonen

Mehrfachauswahl prüfen



Wie fundamentale Wechselwirkungen existieren im Universum?

- ☐ A 1
- ☐ B 3
- ☒ C 4
- ☐ D 5



Welches Teilchen bildet den Hauptbestandteil der sekundären kosmischen Strahlung?

- ☒ A Myon
- ☐ B Protonen
- ☐ C Alphateilchen
- ☐ D Elektronen
- ☐ E schwere Atomkerne



Und zum Schluss: Welche Teilchen können mit einer Nebelkammer nachgewiesen werden?

- ☐ A nur Myonen
- ☐ B nur Protonen, weil sie so schwer sind
- ☒ C alle elektrisch geladenen Teilchen
- ☐ D nur Neutrinos, weil so schnell sind und selten wechselwirken



weiter



Du hast alle Aufgaben richtig beantwortet.  
Gut gemacht!